



Sveučilište u Zagrebu

FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

Ida Midžić

**VREDNOVANJE EKOLOŠKE  
PRIHVATLJIVOSTI U KONCEPTUALNOJ  
FAZI RAZVOJA TEHNIČKIH SUSTAVA**

DOKTORSKI RAD

Zagreb, 2018.



Sveučilište u Zagrebu

FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

Ida Midžić

**VREDNOVANJE EKOLOŠKE  
PRIHVATLJIVOSTI U KONCEPTUALNOJ  
FAZI RAZVOJA TEHNIČKIH SUSTAVA**

DOKTORSKI RAD

Zagreb, 2018.



Sveučilište u Zagrebu

FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

Ida Midžić

**VREDNOVANJE EKOLOŠKE  
PRIHVATLJIVOSTI U KONCEPTUALNOJ  
FAZI RAZVOJA TEHNIČKIH SUSTAVA**

DOKTORSKI RAD

Mentor: prof. dr. sc. Dorian Marjanović

Zagreb, 2018.



University of Zagreb

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING AND NAVAL  
ARCHITECTURE

Ida Midžić

# **ECO-EVALUATION OF TECHNICAL SYSTEMS IN CONCEPTUAL PHASE OF PRODUCT DEVELOPMENT**

DOCTORAL THESIS

Supervisor: Professor Dorian Marjanović, PhD

Zagreb, 2018



## Podatci za bibliografsku karticu

*UDK:*

*Ključne riječi:* konstruiranje, razvoj proizvoda, ekodizajn, konceptualna faza, vrednovanje koncepata, kriteriji ekološke prihvatljivosti, fizikalni efekti, kvaliteta pretvorbe energije, utjecaji na okoliš, procjena životnog ciklusa (LCA), strategije gospodarenja otpadom, rangiranje koncepata.

*Znanstveno područje:* TEHNIČKE ZNANOSTI

*Znanstveno polje:* strojarstvo

*Znanstvena grana:* opće strojarstvo (konstrukcije)

*Institucija u kojoj je*

*rad izrađen:* Fakultet strojarstva i brodogradnje, Sveučilište u Zagrebu

*Mentor:* prof. dr. sc. Dorian Marjanović

*Broj stranica:* 252

*Broj slika:* 72

*Broj tablica:* 50

*Broj uporabljenih  
bibliografskih jedinica:* 381

*Datum obrane:* 29.6.2018.

*Povjerenstvo:* prof. dr. sc. Mario Štorga (FSB, Zagreb) – predsjednik  
prof. dr. sc. Dorian Marjanović (FSB, Zagreb) – mentor  
prof. dr. sc. Roman Žavbi (Univerza v Ljubljani, Fakulteta za  
strojništvo, Ljubljana) – član

*Institucije u kojima je*

*rad pohranjen:* Fakultet strojarstva i brodogradnje, Sveučilište u Zagrebu, Ivana  
Lučića 5, p.p. 102, 10002 Zagreb

Nacionalna i sveučilišna knjižnica u Zagrebu, Hrvatske bratske  
zajednice 4, p.p. 550, 10000 Zagreb

## **Izjava o izvornosti doktorskog rada**

Doktorski rad pod naslovom *Vrednovanje ekološke prihvatljivosti u konceptualnoj fazi razvoja tehničkih sustava* izradila sam na Sveučilištu u Zagrebu Fakultetu strojarstva i brodogradnje, na Zavodu za konstruiranje i Katedri za konstruiranje i razvoj proizvoda.

Izjavljujem da sam doktorski rad izradila samostalno služeći se znanjem i vještinama stečenim ranije i tijekom studija na Fakultetu strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu te služeći se stručnom literaturom navedenom na kraju rada.

Zagreb, 10. lipnja 2018.

Ida Midžić

## Zahvala

Zahvalu upućujem mentoru, profesorima, kolegama, obitelji i prijateljima. Hvala vam što ste bili uz mene tijekom poslijediplomskoga studija i motivirali me na ostvarenje ovoga doktorskog rada.

Hvala, mentore prof. dr. sc. Doriane Marjanoviću, na pruženoj mi prilici da upišem poslijediplomski studij Fakulteta strojarstva i brodogradnje. Hvala na pomoći, potpori i poticanju na znanstveni rad te posebno tijekom razdoblja izrade disertacije. Hvala na strpljivosti i povjerenju, te predanom i stručnom vodstvu kroz poslijediplomski studij. Znanje i vještine koje sam stekla na Katedri za konstruiranje i razvoj proizvoda imaju trajnu vrijednost za mene u smislu cjeloživotnog obrazovanja.

Hvala, prof. dr. sc. Mario Štorga, na trudu, zalaganju i napornom radu čime pridonosite uspješnosti i kvaliteti istraživanja. Hvala na ohrabrenju i savjetima, na obnašanju dužnosti predsjednika povjerenstva za ocjenu i obranu doktorskog rada, te na posvećenosti detaljima tijekom čitanja ove disertacije. Veselim se novim istraživanjima koje ćemo u budućnosti napraviti.

Hvala, prof. dr. sc. Romane Žavbi, na zanimanju za provedeno istraživanje, uloženom trudu tijekom pregleda doktorskog rada, na savjetima kako poboljšati kvalitetu istraživanja i na svemu onome što nisam znala prije konzultacija s vama.

Hvala svima na Katedri za konstruiranje i razvoj proizvoda Fakulteta strojarstva i brodogradnje na stvaranju poticajne radne sredine, timskom radu te razmjeni znanja, iskustava i kontakata sa znanstvenicima na inozemnim sveučilištima. Hvala, prof. dr. sc. Nevene Pavkoviću, na primjedbi da se mi znanstvenici bavimo i književnošću, ali mislim da drukčije ne bi niti trebalo biti. Hvala, prof. dr. sc. Nenade Bojčetiću, na podršci tijekom svih ovih godina.

Hvala Sveučilištu u Zagrebu što je prepoznalo vrijednost i važnost provedenog istraživanja te zahvaljujem na novčanoj podršci Ministarstva znanosti i obrazovanja Republike Hrvatske i Hrvatskoj zakladi za znanost na aktivnostima u vezi s objavljivanjem znanstvenih članaka. Istraživanje ne bi bilo moguće provesti bez potpore *PRé Consultants B.V., Netherlands* i *Ecoinvent Association, Switzerland* te im hvala na odobrenju uporabe softvera *SimaPro™* i na omogućenom pristupu bazi *Ecoinvent™*. Hvala kolegama u Rasco Ltd. – super ste. Hvala mojoj *Drawdown* kohorti te kolegama u GlobalLogic-u i dSPACE engineering-u. Najljepša hvala prijateljicama i prijateljima na potpori i razumijevanju od samih početaka naših druženja i prijateljstava. Posebna hvala mojim strojarima: prijateljicama, prijateljima, kolegicama i kolegama koji su sudjelovali u istraživanju te mi omogućili prikupljanje podataka ključnih za ostvarenje istraživanja i doktorskog rada.

Hvala mami i tati, seki Alisi i Aki na ljubavi i potpori.

## Sažetak

### VREDNOVANJE EKOLOŠKE PRIHVATLJIVOSTI U KONCEPTUALNOJ FAZI RAZVOJA TEHNIČKIH SUSTAVA

U konceptualnoj fazi razvoja tehničkih sustava potrebno je usporedno razmotriti više konceptijskih rješenja te ih vrednovati s obzirom na kvalitetu zadovoljenja potreba korisnika, troškove, rizike, ekološku prihvatljivost i ostale za izbor koncepta važne kriterije. Unatoč dobroj zastupljenosti metoda koje omogućuju vrednovanje ekološke prihvatljivosti tijekom konstruiranja, pregledom literature nisu pronađene metode koje bi bile specifično namijenjene konceptualnoj fazi i vrednovanju konceptijskih rješenja koja se međusobno razlikuju u radnim principima i fizikalnim efektima koje isporučuju. Studija vrednovanja ekološke prihvatljivosti konceptata kvalitativnim kriterijima pokazala je da je vrednovanje podložno subjektivnoj interpretaciji ekološke prihvatljivosti u slučaju kada kriteriji ekološke prihvatljivosti nisu eksplicitno određeni. U skladu s tim i ciljevima istraživanja razvijeni su kriteriji ekološke prihvatljivosti za konceptualnu fazu i predložena metoda. Kriteriji su ekoefektivnost i broj pretvorbi oblika energije i signala, ekološka prihvatljivost i broj sekundarnih efekata na okoliš te broj promjena agregatnoga stanja materijala u tehničkom procesu. Predloženu metodu čine vrednovanje kriterijima i primjena pravila sume rangova u svrhu rangiranja konceptata prema ekološkoj prihvatljivosti. Validacija kriterija i predložene metode temelji se na provjeri unutarnje konzistentnosti i vanjske relevantnosti. Primjena predložene metode demonstrirana je na primjerima vrednovanja ekološke prihvatljivosti konceptata pranja rublja i konceptata stolnog sata. Svrishodnost predložene metode potvrđena je usporedbom s rezultatima studije vrednovanja kvalitativnim smjernicama ekodizajna i procjenom životnog ciklusa konceptata.

**Ključne riječi:** konstruiranje, razvoj proizvoda, ekodizajn, konceptualna faza, vrednovanje konceptata, kriteriji ekološke prihvatljivosti, fizikalni efekti, kvaliteta pretvorbe energije, utjecaji na okoliš, procjena životnog ciklusa (LCA), strategije gospodarenja otpadom, rangiranje konceptata.

## **Extended Abstract**

### **ECO-EVALUATION OF TECHNICAL SYSTEMS IN CONCEPTUAL PHASE OF PRODUCT DEVELOPMENT**

Up to 80% of factors that determine quality, costs, environmental impact and market success of a product are determined during the conceptual design phase. Environmental friendliness of a product under development is one of the many important evaluation criteria to consider during concept selection. Once the concept of a product is selected for further development, improvements to the environmental profile of the product are limited to the embodiment, detailing, and life cycle design changes. Environmental impact assessment is the most widely accepted approach to evaluating environmental friendliness of a product. However, methods such as Life Cycle Assessment (LCA) are not suitable for environmental evaluation in the conceptual design phase and comparison of original design concepts. LCA provides quantitative analysis of environmental impacts of products and processes, but it requires detailed and complete product information which is generally not available in the conceptual phase.

This thesis proposes environmental criteria and eco-evaluation method for technical systems in conceptual phase. Motivation, research questions, research aims and methodology are introduced in Chapter 1 of the thesis. Development of environmentally friendly products and solutions is a major driver for innovation and product development. This is particularly important in cases of new and sustainable alternatives replacing well-established, but environmentally costly products.

Two main approaches to eco-evaluation in the conceptual design phase; qualitative and quantitative eco-evaluation are described in Chapter 2 of the thesis. Qualitative eco-evaluation is concept evaluation based on evaluation of product's attributes according to environmental criteria. Quantitative eco-evaluation is based on life cycle analysis, environmental impact approximation or LCA of similar technical systems used as a reference. Ecodesign methods and tools prescribe using a combination of qualitative multi-criteria eco-evaluation approach and quantitative analytical life cycle assessment. Usually, numerous attributes of the final solution and its life cycle need to be assumed a forehand to perform quantitative eco-evaluation of conceptual solutions. Prejudiced interpretation of environmental friendliness of concepts may lead to negative outcomes such as selection of environmentally unfavourable concept, which later may cause additional costs to the development process.

Environmental impact assessment in the conceptual design phase can be managed without performing LCA by exploiting the commonalities between different product systems. However, currently available environmental impact approximation methods do not support

comparison of original design concepts which are generally concepts without predecessors. Thus, it is usually not manageable to find similar comparable reference products. Further, quantitative eco-evaluation in conceptual phase would require embodiment design to be developed and analytical verification of anticipated life cycle performance of the product.

Eco-evaluation should be neither costly, nor time-consuming and support evaluation of product concepts that potentially integrate new, innovative and original solutions. A qualitative approach to eco-evaluation is thus more suitable for the conceptual design phase.

As qualitative approaches to eco-evaluation are far less studied, generally more prone to the prejudiced interpretation of environmental friendliness by product developers and better suited for conceptual design phase when most information relevant to the future product are qualitative, aims of the research reported in this doctoral thesis are: 1. development of environmental criteria to enable eco-evaluation of technical systems in the conceptual phase of product development, 2. development of eco-evaluation method based on environmental criteria, and 3. enabling eco-evaluation and comparison of technical systems in the conceptual design phase.

Case study on eco-evaluation of laundry cleaning concepts using ecodesign guidelines as environmental criteria is described in Chapter 3. Appropriateness of ecodesign guidelines to be used as environmental criteria is investigated in the case study. Mechanical engineers were given a task to evaluate environmental friendliness of five laundry cleaning conceptual solutions and to rank the concepts accordingly. In the first part of the case study, evaluation criteria were not proposed to evaluators, so consequently obtained rankings were based on their subjective preferences and personal notions on environmentally better and worse concepts. In the case of two concepts, a paradoxical situation occurred, known as Arrow's paradox where some evaluators ranked one product concept as one of the least environmentally friendly concepts and other evaluators ranked the same concept as one of the best environmentally friendly concepts. Concept rankings were generated by evaluators individually, so the case study was focused on evaluators working independently.

In the second part of the case study, the same set of concepts was eco-evaluated. This time evaluators used ecodesign guidelines as environmental criteria and a datum ranking method. Different rankings of concepts have been established and results of the two sets of rankings are compared. There was more dissimilarity in rankings of less environmentally friendly concepts in the first part of the case study. One of the reasons for this outcome may be a lack of information on environmental criteria that need to correspond to all the various product concepts presented to evaluators. Then, there is a lack of environmentally related information about the likely performance of those concepts. Thirdly, personal preferences and experiences guided evaluators in their choice of more and less eco-friendly concepts. The introduction of eco-evaluation criteria in the second part of the case study has yielded more coherent rankings.

Results of the case study show that using ecodesign guidelines as environmental criteria is a better option than not using any criteria during concept evaluation. However, most of environmental criteria prescribed by ecodesign guidelines refer to product attributes which were not available in the description of laundry washing concepts in the study. According to widely available models of the design process, technical systems' concepts can be described by their functions, physical effects, working principles and principle solutions. Embodiment and detailing are usually performed after the concept is selected for further development as the most promising solution. Detailed information about concepts is usually not available in the conceptual design phase. A question arises on how to enable environmental evaluation in the conceptual design phase since information about the product at this phase are mostly qualitative, product key features and embodiments are not finalized and the life cycle of the product is unknown or vaguely defined.

Environmental criteria and eco-evaluation method are proposed in Chapter 4 of the thesis. As the concept of a product can be represented and modelled as high-level abstraction model where functions of the product are thought of as transformation entities, each concept is described by chains of energy, material and signal transformations which enable particular physical effects. Energy, material, and signal transformed in the technical process are called operands. Since chains of physical effects and secondary effects towards the environment can be deduced from the technical process, environmental friendliness of a technical system can also be known by assessing the properties of operands transformed in the technical process. The hypothesis of doctoral dissertation is: eco-evaluation of a particular technical system can be managed by assessing properties of operands transformed in the technical process.

Specifically developed within the thesis to support product concept eco-evaluation, five environmental criteria is the basis of the method proposed to support technical systems' concept eco-evaluation. Chains of effects and secondary effects towards the environment contain input data for the method proposed. Eco-evaluation is performed by evaluating energy, material and signal transformations indicated by chains of physical effects and secondary effects towards the environment which are outputs from the technical process.

Theoretical background of energy transformity effectiveness criterion is energy theory. According to emergy theorists, quality of different energy forms, materials, and services (environmental, human and economic) can be evaluated on a common basis by conversion of Joules, calories and other energy units to a unified form of available energy. In this case, the chosen energy units are solar emergy units called solar transformities. Solar transformities can be defined for conversions of solar energy units to other energy form units (wind kinetic energy, tide energy, Earth crustal heat), use of resources (coal, fuel, wood) and some other flows which do not have to be exclusively energy, but are a result of previous energy or resource utilization processes such as human services and information. Solar transformity factors are quantifiable in form of solar emergy units per unit of useful energy in corresponding energy form. Solar emergy units can be calculated by including all energy and

resource utilization processes to produce useful energy in a desirable energy form. Then, a hierarchy of energy forms can be composed and it includes energy forms of lower and higher quality, ranked in an orderly list format. Inspired by energy theory, favourable energy transformations are energy transformations where low-quality energy forms are used up to realize the work potential of high-quality energy forms. Energy transformity effectiveness criterion considers the type of energy form transformations that are indicated by the functions of the product (for example, conversion of electrical to mechanical energy, electromagnetic to heat, mechanical to acoustic energy etc.). Energy transformity of a particular energy conversion process is a coefficient of solar transformity of output energy form and solar transformity of input energy form. Energy transformity effectiveness is a sum of all energy transformities of energy transformations indicated by the chains of physical effects inherent to the concept of the technical system. Energy transformity can be defined only for functions of the product indicating that there is a change (conversion of or transformation) in the energy form between input energy flow and output energy flow. For some energy forms, energy transformity factors are very large, so transformity factors are transformed into a logarithmic scale which simplifies calculation.

The second environmental criterion is a minimizing criterion of the total number of energy, material and signal transformations. An optimal solution is characterized by the high value in energy transformity effectiveness and the low total number of energy, material and signal transformations.

The criterion of eco-quality of energy, material and signal waste or emissions corresponds to evaluating secondary effects towards the environment, e.g. output flows of energy, material, and signal to the environment. This is an eco-criterion for evaluating material operand transformations that are non-intended secondary outputs (e.g. waste, pollutants, and emissions). The criterion is based on adopted concepts of waste management hierarchy, levels of waste toxicity and environmental friendliness of end of life treatments. To each option, a value from a twenty-point scale is assigned. The scale provides sufficiently fine measurements without being overly precise. It is linear and ranges from -10 to 10. Values of zero, 5 and -5 are not specified to give a more rigorous value distribution between more and less prosperous solutions. Eco-quality of energy, material and signal waste or emissions equals sum of eco-quality of all output flows.

Criterion of number of material, energy and signal waste or emissions corresponds to evaluating the number of different output flows of energy, material, or a signal which can be deduced from the function structure or chains of effects of the concept. An optimal solution is characterized by the high value of eco-quality of energy, material and signal waste or emissions and low value of total number of energy, material and signal waste or emissions, e.g. outputs to the environment potentially resulting in environmental impact.

Fifth environmental criterion is the number of transformations in which material changes states (solid, gas, liquid). The change of material state indicates that additional energy is



required for the transformation to occur. It also points out some special material properties required for principle solutions supporting the transformation (such as heat resistance), and as such are indicative of additional or lower environmental impact.

Proposed eco-evaluation method is based on five environmental criteria, rank-sum rule to aggregate the criteria outcomes, and is supported by a decision matrix. Eco-evaluation by using the proposed method produces a ranking of concepts indicating environmental friendliness of concepts in a comparable way. Environmental criteria and eco-evaluation method proposed are specifically developed for qualitative eco-evaluation in the conceptual design phase. Environmental criteria and method proposed are also the main theoretical and practical contributions of the work reported in this doctoral thesis. Methodological contribution is achieved by providing validation of proposed method by means of results from a case study on eco-evaluation using ecodesign guidelines, LCA study of laundry cleaning concepts and Validation Square – a method for validating design methods.

Effectiveness and efficiency of environmental criteria and eco-evaluation method proposed are demonstrated on two illustrative set of examples. The first set examples are laundry cleaning concepts. Results LCA of laundry cleaning concepts are described in Chapter 5, and these are compared to eco-rankings produced by mechanical engineers in a case study. The second set of concepts used to test the proposed eco-evaluation method is based upon rankings comparison of three alarm clock concepts: mechanical, electro-mechanical and digital alarm clock. Environmental friendliness of alarm clock concepts has been based on data from a study on redesign of alarm clock concepts available from literature.

Examples of using the proposed method confirm that the proposed method supports qualitative approach to evaluating conceptual solutions and provides support for original design concepts. The effectiveness of the proposed method is confirmed by comparing eco-rankings of laundry cleaning concepts produced by engineering designers in a case study, eco-rankings of the same concepts based on LCA results and eco-rankings resulting from applying the proposed method to the same set of concepts. Chapter 6 describes requirements regarding theoretical and empirical suitability and acceptability of the proposed method for conceptual phase of technical system development. Some of the limitations of the proposed method are that it requires additional effort from users regarding concept analysis, identification of chains of physical effects, and secondary effects, and the users are at risk of inconsistent valuation of secondary effects. Conclusions and future work are described in final chapter of the thesis.

**Keywords:** *engineering design, product development, ecodesign, conceptual phase, concept evaluation, environmental criteria, physical effects, energy transformation quality, environmental impact, life cycle assessment (LCA), waste management hierarchy, concept ranking.*

## Popis oznaka

Oznaka	Mjerna jedinica	Značenje
$A_i$	-	koncept proizvoda iz skupa koncepata proizvoda $A_i$ ( $i = 1, \dots, n$ )
$C_j$	-	kriterij ekološke prihvatljivosti iz skupa kriterija ekološke prihvatljivosti koncepata proizvoda $C_j$ ( $j = 1, \dots, m = 5$ )
$E_A$	$seJ/J$	faktor transformabilnosti energije anorganskog materijala
$E_B$	$seJ/J$	faktor transformabilnosti biološke energije i proteina
$E_{Ch}$	$seJ/J$	faktor transformabilnosti kemijske energije
$E_E$	$seJ/J$	faktor transformabilnosti električne energije
$E_{EM}$	$seJ/J$	faktor transformabilnosti elektromagnetske energije
$E_F$	$seJ/J$	faktor transformabilnosti energije goriva
$E_H$	$seJ/J$	faktor transformabilnosti toplinske energije
$E_{HeO}$	$seJ/J$	faktor transformabilnosti energije heterogenog organskog materijala
$E_{HoO}$	$seJ/J$	faktor transformabilnosti energije homogenog organskog materijala
$E_{Hu}$	$seJ/J$	faktor transformabilnosti ljudske snage
$E_I$	$seJ/J$	faktor transformabilnosti informacija, tj. signala
$E_K$	$seJ/J$	faktor transformabilnosti kinetičke energije
$E_{LCh}$	$seJ/J$	faktor transformabilnosti latentne kemijske i svjetlosne energije
$E_{LH}$	$seJ/J$	faktor transformabilnosti latentne toplinske energije
$E_{Me}$	$seJ/J$	faktor transformabilnosti mehaničke energije
$E_N$	$seJ/J$	faktor transformabilnosti nuklearne energije
$E_P$	$seJ/J$	faktor transformabilnosti potencijalne energije
$E_{So}$	$seJ/J$	faktor transformabilnosti solarne energije
$E_W$	$seJ/J$	faktor transformabilnosti energije vjetra
$E_{WT}$	$seJ/J$	faktor transformabilnosti energije valova, plime i oseke
$E_m$	$seJ$	solarna energija (količina energije po jedinici solarne energije)
$E_t$	$kWh$	potrošnja energije za standardni ciklus pranja
$E_x$	$J$	eksergija
$L_p$	$dB$	razina zvučnog tlaka (razina buke)

Oznaka	Mjerna jedinica	Značenje
$M_R$	-	matrica relacija skupa koncepata proizvoda $A_i$ i skupa kriterija ekološke prihvatljivosti koncepata proizvoda $C_j$
$N_{Agr}(A_i)$	-	dobrota koncepta proizvoda $A_i$ s obzirom na kriterij broja promjena agregatnoga stanja materijala koncepata proizvoda
$N_{\epsilon_{EF}}(A_i)$	-	dobrota koncepta proizvoda $A_i$ s obzirom na kriterij broja sekundarnih (latentnih) efekata na okoliš koncepata proizvoda
$N_{\epsilon_{TR}}(A_i)$	-	dobrota koncepta proizvoda $A_i$ s obzirom na kriterij broja pretvorbi oblika energije koncepata proizvoda
$P$	$W$	snaga
$PE$	-	engl. <i>personal equivalent</i> – jedinica utjecaja na okoliš po osobi
$Pt$	$Pt$	engl. <i>ecopoint</i> – jedinica utjecaja na okoliš
$R$	-	raspon uzorka
$S_{\epsilon_{EF}}(A_i)$	-	dobrota koncepta proizvoda $A_i$ s obzirom na kriterij ekološke prihvatljivosti sekundarnih (latentnih) efekata na okoliš koncepata proizvoda
$S_{\epsilon_{TR}}(A_i)$	-	dobrota koncepta proizvoda $A_i$ s obzirom na kriterij ekoefektivnosti pretvorbe oblika energije, materijala i signala koncepata proizvoda
$T_o$	$K, ^\circ C$	temperatura
$V_o$	$m^3$	volumen
$V(A_i)$	-	rang dobrote koncepta proizvoda $A_i$ ( $i = 1, \dots, n$ ) s obzirom na kriterije ekološke prihvatljivosti koncepata proizvoda $C_j$ ( $j = 1, \dots, m = 5$ )
$V(x_j(A_i))$	-	rang dobrote $x_j$ koncepta proizvoda $A_i$ s obzirom na kriterij ekološke prihvatljivosti koncepata proizvoda $C_j$ ( $j = 1, \dots, m = 5$ )
$W_t$	$m^3/ciklus$	potrošnja vode za standardni ciklus pranja
$e_{ij}$	-	rang dobrote koncepta proizvoda $A_i$ ( $i = 1, \dots, n$ ) s obzirom na kriterij ekološke prihvatljivosti koncepata proizvoda $C_j$
$f_{TR}$	$seJ/J$	faktor solarne transformabilnosti oblika energije
$f_{TR_I}$	$seJ/J$	faktor (solarne) transformabilnosti ulaznog oblika energije
$f_{TR_O}$	$seJ/J$	faktor (solarne) transformabilnosti izlaznog oblika energije
$m_a$	$kg$	masa

Oznaka	Mjerna jedinica	Značenje
$m$	-	broj kriterija ekološke prihvatljivosti u skupu kriterija ekološke prihvatljivosti koncepata proizvoda $C_j$ ( $j = 1, \dots, m = 5$ )
$n$	-	broj koncepata proizvoda u skupu koncepata proizvoda $A_i$ ( $i = 1, \dots, n$ )
$p$	$Pa$	tlak
$t$	$s$	vrijeme
$w_j$	-	relativne važnosti, tj. težinski koeficijenti kriterija ekološke prihvatljivosti koncepata proizvoda $C_j$ ( $j = 1, \dots, m = 5$ )
$\bar{x}$	-	aritmetička sredina uzorka
$x_{ij}$	-	značajka $j$ koncepta $A_i$
$x_j(A_i)$	-	stupanj zadovoljenja kriterija ekološke prihvatljivosti $C_j$ koncepta proizvoda $A_i$ , tj. dobrota koncepta $A_i$ s obzirom na kriterij ekološke prihvatljivosti koncepata proizvoda $C_j$
$\Delta S$	$J$	entropija
$\rho_{ij}$	-	članovi matrice relacija $M_R$ skupa koncepata $A_i$ ( $i = 1, \dots, n$ ) i skupa kriterija ekološke prihvatljivosti $C_j$ ( $j = 1, \dots, m = 5$ )
$\sigma$	-	grč. <i>sigma</i> , standardna devijacija uzorka
$\omega$	$^{\circ}/min$	grč. <i>omega</i> , kutna brzina
$\epsilon_{TR}$	-	grč. <i>epsilon</i> , teorijska ekoefektivnost pretvorbe (transformacije) oblika energije

## Popis skraćenica

Skraćenica	Značenje
ABS	... akril-butadien-stirol
$Al+Zn+Cu$	... aluminijska legura
<i>AE11</i>	... engl. <i>Ethoxylated alcohol</i> – etoksilirani alkohol
<i>BOM</i>	... engl. <i>Bill of materials</i> – lista materijala proizvoda
<i>CAD</i>	... engl. <i>Computer Aided Design</i> – računalom podržano konstruiranje
$CH_4$	... metan
$CO_2$	... ugljikov dioksid
<i>DAS1</i>	... engl. <i>Fluorescent whitening agent</i> – fluorescentni izbjeljivač
<i>DR</i>	... engl. <i>Design Repository</i>
<i>DRM</i>	... engl. <i>Design Research Methodology</i>
<i>EuP</i>	... engl. <i>energy using products</i> – proizvodi koji se za rad koriste energijom
<i>Faktor X</i>	... faktor poboljšanja ekoefikasnosti proizvoda
<i>FIM</i>	... <i>Function Impact Matrix</i> metoda
<i>GHG</i>	... engl. <i>greenhouse gases</i> – staklenički plinovi
<i>IEC</i>	... engl. <i>International Electrotechnical Commission</i>
<i>ISO</i>	... engl. <i>International Organization for Standardization</i> – Međunarodna organizacija za standarde i standardizaciju
<i>LAS</i>	... engl. <i>Alkylbenzene sulfonate, linear</i> – linearni alkil-benzen sulfonat
<i>LCA</i>	... engl. <i>Life Cycle Assessment</i> – procjena životnog ciklusa
<i>LCC</i>	... engl. <i>Life Cycle Costing</i> – procjena troškova životnog ciklusa
<i>LCD</i>	... engl. <i>liquid crystal display</i>
<i>LCP</i>	... engl. <i>Life Cycle Planning</i> – projektiranje životnog ciklusa
<i>MDF</i>	... engl. <i>medium density fiber</i> – medijapan
<i>PE</i>	... polietilen
<i>PMMA</i>	... poli-metil-meta krilat
<i>QFD</i>	... engl. <i>Quality Function Deployment</i> – Kuća kvalitete
<i>SLCA</i>	... engl. <i>Streamlined (Simplified) Life Cycle Assessment</i>
$SO_2$	... sumporov dioksid
<i>STPP</i>	... engl. <i>Sodium tripolyphosphate</i> – natrijev trifosfat

## Popis slika

<b>Slika 1.1.</b>	Utjecaj odluka na znanje i informacije o proizvodu, troškove izmjena, stupanj slobode rješenja i utjecaje na okoliš [3], [4], [5].....	2
<b>Slika 1.2.</b>	Koraci provedenog istraživanja .....	10
<b>Slika 2.1.</b>	Model razvoja proizvoda (Andreasen i drugi [94]) .....	20
<b>Slika 2.2.</b>	Proces razvoja prema ISO/TR 14062 [98], [99] .....	21
<b>Slika 2.3.</b>	Proces razvoja ekološki prihvatljivih proizvoda – ekodizajn [122].....	25
<b>Slika 2.4.</b>	Ekodizajn, razvoj održivih proizvoda i održivi razvoj [24] .....	26
<b>Slika 2.5.</b>	Utjecaj odluka tijekom konstruiranja i razvoja proizvoda na konačni utjecaj proizvoda na okoliš i troškove [29] .....	28
<b>Slika 2.6.</b>	Faze životnog ciklusa i strategije poboljšanja ekoefektivnosti proizvoda (ilustrirano prema [144]) .....	30
<b>Slika 2.7.</b>	Četiri strategije za postizanje poboljšanja ekoefikasnosti proizvoda [8].....	31
<b>Slika 2.8.</b>	Stupanj razrade rješenja i informacije o ekološkoj prihvatljivosti tijekom konstruiranja i razvoja proizvoda [143] .....	60
<b>Slika 3.1.</b>	a) Potrošnja energije automatske perilice rublja za različite temperature pranja; b) Utjecaj temperature pranja na emisije stakleničkih plinova [280] .....	72
<b>Slika 3.2.</b>	Koncept B – Eco Bubble™ pranje tekstila pjenom deterdženta i vode [284] ....	73
<b>Slika 3.3.</b>	a) Sustav za ultrazvučno pranje tekstila [285]; b) Electrolux Ultra Clean perilica rublja s olovkom za uklanjanje manjih mrlja ultrazvukom [286] .....	74
<b>Slika 3.4.</b>	Koncept D - ‘Orbit’ koncept pranja tekstila suhim ledom [287]; slike dostupne na [288], [289] .....	75
<b>Slika 3.5.</b>	Koncept E - pranje tekstila polimernim kuglicama [290] .....	76
<b>Slika 3.6.</b>	Tri faze studije slučaja .....	77
<b>Slika 3.7.</b>	Obrasci za zapisivanje vrednovanja i rangiranja u studiji slučaja .....	79
<b>Slika 4.1.</b>	Prikaz relacija između skupa koncepata i skupa kriterija vrednovanja (ilustrirano prema [301]).....	91
<b>Slika 4.2.</b>	Opći prikaz matrice odlučivanja [303].....	92
<b>Slika 4.3.</b>	Tehnički proces i fizikalni efekti procesa pranja rublja (koncept A).....	110
<b>Slika 4.4.</b>	Prikaz koncepata američke (a), europske (b) i japanske (c) perilice za strojno pranje rublja u kućanstvima [318] .....	110
<b>Slika 4.5.</b>	Oznake funkcija, operanada i sekundarnih efekata na okoliš u modelu funkcija s pomoću tijeka.....	111
<b>Slika 4.6.</b>	Model funkcija s pomoću tijeka koncepta pranja rublja praškastim deterdžentom i toplom vodom (60 °C/90 °C), (legenda: slika 4.5.) .....	112
<b>Slika 4.7.</b>	Funkcijska struktura koncepta pranja rublja praškastim deterdžentom i toplom vodom (60 °C/90 °C) .....	112
<b>Slika 4.8.</b>	Lanac fizikalnih efekata L1 (koncept pranja rublja A) .....	114
<b>Slika 4.9.</b>	Lanci fizikalnih efekata koncepta pranja rublja A (legenda: slika 4.8.) .....	114

<b>Slika 4.10.</b>	Funkcijska struktura koncepta pranja rublja B .....	118
<b>Slika 4.11.</b>	Tehnički proces i fizikalni efekti ultrazvučnog pranja rublja (koncept C) .....	120
<b>Slika 4.12.</b>	Funkcijska struktura koncepta pranja rublja C .....	121
<b>Slika 4.13.</b>	Lanci fizikalnih efekata koncepta pranja rublja C (legenda: slika 4.8.) .....	123
<b>Slika 4.14.</b>	Principijelna rješenja i glavne komponente 'Orbit' koncepta [289] .....	124
<b>Slika 4.15.</b>	Fazni dijagram ugljikova dioksida (tlak – temperatura) [324] .....	124
<b>Slika 4.16.</b>	Tehnički proces i efekti procesa pranja rublja suhim ledom (a-varijanta koncepta pranja rublja D) .....	125
<b>Slika 4.17.</b>	Funkcijska struktura koncepta pranja rublja D <sup>a</sup> .....	125
<b>Slika 4.18.</b>	Lanci fizikalnih efekata koncepta pranja rublja D <sup>a</sup> (legenda: slika 4.8.) .....	127
<b>Slika 4.19.</b>	Tehnički proces i efekti procesa pranja rublja (koncept E) .....	128
<b>Slika 4.20.</b>	Funkcijska struktura koncepta E .....	128
<b>Slika 4.21.</b>	Tehnički proces i efekti procesa pranja rublja/tekstila suhim ledom (b-varijanta koncepta D) .....	132
<b>Slika 4.22.</b>	Uređaj Electrolux Wascator S-35 (lijevo) i prikaz radnog principa (desno) [324] .....	132
<b>Slika 4.23.</b>	Funkcijska struktura koncepta pranja rublja D <sup>b</sup> .....	133
<b>Slika 4.24.</b>	Lanci fizikalnih efekata koncepta pranja rublja D <sup>b</sup> (legenda: slika 4.8.) .....	134
<b>Slika 4.25.</b>	Funkcijska struktura mehaničkog sata budilice .....	139
<b>Slika 4.26.</b>	Legenda oznaka lanaca fizikalnih efekata koncepta sata budilice .....	139
<b>Slika 4.27.</b>	Lanci fizikalnih efekata i sekundarni efekti na okoliš koncepta mehaničkog sata budilice (legenda: slika 4.26.) .....	140
<b>Slika 4.28.</b>	Lanci fizikalnih efekata i sekundarni efekti na okoliš koncepta mehaničko-digitalnog sata budilice (legenda: slika 4.26.) .....	143
<b>Slika 4.29.</b>	Funkcijska struktura mehaničko-digitalnog sata budilice .....	143
<b>Slika 4.30.</b>	Funkcijska struktura digitalnog sata budilice .....	146
<b>Slika 4.31.</b>	Lanci fizikalnih efekata i sekundarni efekti na okoliš koncepta digitalnog sata budilice (legenda: slika 4.26.) .....	147
<b>Slika 4.32.</b>	Utjecaji na okoliš tri stolna sata budilice [330] .....	151
<b>Slika 5.1.</b>	Koraci analize proizvoda i procjene životnog ciklusa proizvoda (LCA) [100] .....	157
<b>Slika 5.2.</b>	Prikaz procesa i faza životnog ciklusa koji su uključeni u studiju životnog ciklusa konceptijskih rješenja A, B, C, D i E (ilustracija prema [349]) .....	163
<b>Slika 5.3.</b>	Utjecaji na okoliš deterdženta za strojno pranje rublja .....	166
<b>Slika 5.4.</b>	Analiza utjecaja na okoliš, kategorije srednjih utjecaja, životni ciklus koncepta pranja rublja A .....	168
<b>Slika 5.5.</b>	Utjecaji na okoliš materijala perilice rublja koncepta pranja rublja A .....	168
<b>Slika 5.6.</b>	Dijagram potraživanja snage električne energije po ciklusu pranja deterdžentom i toplom vodom (30 °C) [356] .....	170
<b>Slika 5.7.</b>	Kategorije srednjih utjecaja na okoliš materijala perilice rublja (koncept B)... ..	172
<b>Slika 5.8.</b>	Analiza utjecaja na okoliš koncepta B (životni ciklus, kategorije srednjih utjecaja) .....	173

<b>Slika 5.9.</b>	Usporedba utjecaja na okoliš životnih ciklusa koncepata A i B .....	173
<b>Slika 5.10.</b>	Usporedba refleksijskih vrijednosti pranja deterdžentom i toplom vodom (25 °C) i ultrazvučnog pranja [323] .....	174
<b>Slika 5.11.</b>	Koncept C – prototip ultrazvučne perilice rublja [323] .....	175
<b>Slika 5.12.</b>	Usporedba utjecaja na okoliš: a) praškastog deterdženta (koncepti A i B); b) tekućeg deterdženta za pranje tekstila koji je propisan patentom [323]; c) tekućeg deterdženta za strojno pranje rublja .....	176
<b>Slika 5.13.</b>	Dijelovi sustava za ultrazvučno pranje tekstila prema patentu [358], oznake dijelova sustava: tablica 5.8. ....	177
<b>Slika 5.14.</b>	Usporedba utjecaja na okoliš životnog ciklusa koncepta A, koncepta B, koncepta C_test i koncepta C_NEW .....	178
<b>Slika 5.15.</b>	Usporedba utjecaja na okoliš koncepata A, B, C, D <sup>a</sup> i D <sup>b</sup> .....	180
<b>Slika 5.16.</b>	a) Skica polimernih kuglica u bubnju perilice [362]; b) Prikaz upravljanja perilicom Xeros [363]; c) Prikaz polimernih kuglica u bubnju perilice Xeros [363] .....	181
<b>Slika 5.17.</b>	Xeros perilica rublja [364] .....	182
<b>Slika 5.18.</b>	Analiza utjecaja na okoliš životnog ciklusa koncepta E .....	182
<b>Slika 5.19.</b>	Usporedba utjecaja na okoliš koncepata (težinski faktori, prikaz po kategorijama srednjih utjecaja) .....	184
<b>Slika 5.20.</b>	Usporedba utjecaja na okoliš koncepata A, B, C, D <sup>a</sup> , D <sup>b</sup> i E .....	184
<b>Slika 6.1.</b>	Prikaz vrednovanja ekološke prihvatljivosti koncepata predloženom metodom .....	196
<b>Slika 6.2.</b>	Usporedba rangiranja koncepata pranja rublja u studiji vrednovanja ([63], [81]) i predloženom metodom .....	199
<b>Slika 6.3.</b>	Rangiranje koncepata pranja rublja predloženom metodom i metodom LCA; lijevo: skup koncepata A, B, C, D <sup>a</sup> i E (1), desno: skup koncepata A, B, C, D <sup>b</sup> i E (2) .....	201



## Popis tablica

<b>Tablica 2.1.</b>	Analiza pojmova koncept proizvoda i radni principi proizvoda.....	24
<b>Tablica 2.2.</b>	Prednosti ekodizajna [136], [137] .....	27
<b>Tablica 2.3.</b>	Vanjski faktori i utjecaji na motivaciju te unutarnje motivacije poduzeća za implementaciju ekodizajna u okruženje poduzeća [118] .....	27
<b>Tablica 2.4.</b>	Strategije poboljšanja ekološke prihvatljivosti proizvoda [152].....	32
<b>Tablica 2.5.</b>	Obilježja kvalitativnih ekodizajn metoda i alata s obzirom na vrstu vrednovanja i svrhu metode (G – generiranje koncepata, A – analiza koncepata, R – rekonstrukcija).....	37
<b>Tablica 2.6.</b>	Obilježja semikvantitativnih ekodizajn metoda i alata s obzirom na vrstu vrednovanja i svrhu metode (G – generiranje koncepata, A – analiza koncepata, R – rekonstrukcija).....	42
<b>Tablica 2.7.</b>	Generički zahtjevi za vrednovanje proizvoda prema modelu za konstruiranje ekološki prihvatljivih proizvoda [3].....	60
<b>Tablica 3.1.</b>	Kvalitativni kriteriji ekološke prihvatljivosti: metode i alati s do 6 kriterija ..	65
<b>Tablica 3.2.</b>	Kvalitativni kriteriji ekološke prihvatljivosti: metode i alati s više od 6 kriterija .....	66
<b>Tablica 3.3.</b>	Kriteriji ekološke prihvatljivosti propisani smjernicama Eco-Design Value [82] .....	68
<b>Tablica 3.4.</b>	Profesionalne kvalifikacije sudionika studije.....	69
<b>Tablica 3.5.</b>	Iskustvo sudionika studije .....	69
<b>Tablica 3.6.</b>	Primjeri konceptijskih rješenja pranja rublja [73] .....	71
<b>Tablica 3.7.</b>	Podatci o konceptima pranja rublja A, B, C, D i E u studiji slučaja vrednovanja ekološke prihvatljivosti koncepata proizvoda [81].....	77
<b>Tablica 3.8.</b>	Rezultati prvog i drugog rangiranja ekološke prihvatljivosti koncepata od sudionika studije slučaja.....	80
<b>Tablica 3.9.</b>	Pregled rezultata nakon bodovanja zbog drugog po redu rangiranja, kada su sudionici studije vrednovali koncepte prema Eco-Design Value smjernicama [82] .....	81
<b>Tablica 4.1.</b>	Koraci vrednovanja prema de Boeru [305] .....	93
<b>Tablica 4.2.</b>	Usporedba metoda odlučivanja [292] .....	94
<b>Tablica 4.3.</b>	Koraci predložene metode.....	95
<b>Tablica 4.4.</b>	Primjeri faktora pretvorbe oblika energije (transformabilnosti) [70], [243], i ekvivalentne solarne jedinice energije [309].....	98
<b>Tablica 4.5.</b>	Faktori za pretvorbu oblika energije u jedinice solarne energije [70], [311].	99
<b>Tablica 4.6.</b>	Teorijska ekoefektivnost transformabilnosti oblika energije (oznake: tablica 4.5. ).....	101
<b>Tablica 4.7.</b>	Smjernice za vrednovanje ekološke prihvatljivosti sekundarnih efekata na okoliš [69] .....	104
<b>Tablica 4.8.</b>	Vrijednosna ljestvica za ocjenjivanje dobrote sekundarnih efekata na okoliš	

	.....	105
<b>Tablica 4.9.</b>	Razrada fizikalnih zakona lanca fizikalnih efekata L1 koncepta pranja rublja A.....	115
<b>Tablica 4.10.</b>	Pomoćna tablica za vrednovanje koncepta pranja rublja A.....	117
<b>Tablica 4.11.</b>	Pomoćna tablica za vrednovanje koncepta pranja rublja B.....	119
<b>Tablica 4.12.</b>	Pomoćna tablica za vrednovanje koncepta pranja rublja C.....	122
<b>Tablica 4.13.</b>	Pomoćna tablica za vrednovanje koncepta pranja rublja D <sup>a</sup> .....	126
<b>Tablica 4.14.</b>	Pomoćna tablica za vrednovanje koncepta pranja rublja E.....	129
<b>Tablica 4.15.</b>	Matrica odlučivanja (koncepti pranja rublja A, B, C, D <sup>a</sup> i E).....	130
<b>Tablica 4.16.</b>	Pomoćna tablica za vrednovanje koncepta pranja rublja D <sup>b</sup> .....	135
<b>Tablica 4.17.</b>	Matrica odlučivanja (koncepti pranja rublja A, B, C, D <sup>b</sup> i E).....	136
<b>Tablica 4.18.</b>	Pomoćna tablica za vrednovanje mehaničkog sata budilice.....	141
<b>Tablica 4.19.</b>	Pomoćna tablica za vrednovanje mehaničko-digitalnog sata budilice.....	144
<b>Tablica 4.20.</b>	Pomoćna tablica za vrednovanje digitalnog sata budilice.....	148
<b>Tablica 4.21.</b>	Matrica odlučivanja predloženom metodom (koncepti stolnog sata budilice).....	149
<b>Tablica 5.1.</b>	Metodološki koraci procjene životnog ciklusa (LCA) [1].....	158
<b>Tablica 5.2.</b>	Sastav praškastog deterdženta za strojno pranje rublja.....	165
<b>Tablica 5.3.</b>	Potrošnja električne energije i vode koncepta A [348].....	166
<b>Tablica 5.4.</b>	Potrošnja električne energije i vode za 1 ciklus strojnog pranja 5 kilograma rublja u perilici rublja [279].....	167
<b>Tablica 5.5.</b>	Lista materijala automatske perilice rublja za kućanstva: a) Machine II.2, godina proizvodnje: 2004. [279]; b) Novomatic, godina proizvodnje: 2005. [355]; c) Adora, godina proizvodnje: 2011. [355]; d) Eco Bubble™ [345] .	169
<b>Tablica 5.6.</b>	Obilježja i performanse perilice rublja s Eco Bubble™ tehnologijom kapaciteta 6 kg (model WFF400E, Samsung) [345].....	171
<b>Tablica 5.7.</b>	Sastav tekućeg deterdženta za strojno pranje rublja.....	176
<b>Tablica 5.8.</b>	Dijelovi sustava za ultrazvučno pranje tekstila u tekućem mediju [358].....	177
<b>Tablica 5.9.</b>	Lista materijala perilica – koeficijenti za procjenu liste materijala.....	186
<b>Tablica 5.10.</b>	Metodološki koraci procjene životnog ciklusa (LCA) i uzroci mogućih odstupanja i nesigurnosti pri generiranju rezultata procjene [368], [369] ....	188
<b>Tablica 6.1.</b>	Vrednovanje elemenata predložene metode [83] – 1. dio.....	192
<b>Tablica 6.2.</b>	Vrednovanje elemenata predložene metode [83] – 2. dio.....	193
<b>Tablica 6.3.</b>	Provjera vanjske relevantnosti predložene metode na temelju kvalitete odlučivanja.....	203

## Predgovor

Istraživanje prikazano u ovome doktorskom radu dio je projekta 120-1201829-1828 *Modeli i metode upravljanja znanjem u razvoju proizvoda* Ministarstva znanosti, obrazovanja i sporta Republike Hrvatske te projekta MInMED – „*Models and Methods of Innovation Management in Complex Engineering Systems Development*“ Ministarstva znanosti, obrazovanja i sporta Republike Hrvatske i Hrvatske zaklade za znanost. Tema istraživanja prikazanog u disertaciji jest vrednovanje ekološke prihvatljivosti u konceptualnoj fazi razvoja tehničkih sustava.

Odluka o konceptu proizvoda od velike je važnosti za uspješnost proizvoda na tržištu. U konceptualnoj fazi razvoja tehničkog sustava konceptijska se rješenja generiraju, razmatraju i vrednuju sa svrhom osmišljavanja i odabira najprihvatljivijega konceptijskog rješenja za daljnji razvoj. Pregledom literature o ekodizajnu pri konstruiranju ustanovljeno je da postoji potreba za razvojem metode vrednovanja kojom bi bilo moguće usporediti ekološku prihvatljivost konceptata tehničkih sustava koji se temelje na različitim radnim principima.

Vrednovanje tehničkih sustava u konceptualnoj fazi s obzirom na kriterije ekološke prihvatljivosti za poduzeća može biti jednako važno kao i vrednovanje s obzirom na kvalitetu zadovoljenja korisničkih potreba, troškove, rizike i resurse. Iako to nije uvijek slučaj u praksi, ekološku prihvatljivost tehničkih sustava potrebno je provjeriti dovoljno rano u procesu konstruiranja da bi bilo moguće učiniti korake prema razvoju koncepta s poželjnim odlikama te izbjeći rješenja s nepoželjnim i neprimjerenim utjecajima na okoliš.

Konceptualna faza i odluke koje su donesene na temelju zaključaka donesenih u toj fazi odlučujuće su za razvoj ekološki prihvatljivih proizvoda. Istraživanjem je potvrđeno da je moguće ostvariti vrednovanje ekološke prihvatljivosti u konceptualnoj fazi tijekom koje uobičajeno nedostaju podatci za procjenu utjecaja na okoliš i analizu životnog ciklusa proizvoda. Analiza lanaca fizikalnih efekata i sekundarnih efekata na okoliš omogućuju razmatranje značajki i vrednovanje ekološke prihvatljivosti konceptijskih rješenja u procesu konstruiranja. Kriteriji ekološke prihvatljivosti i predložena metoda podržavaju aktivnosti vrednovanja ekološke prihvatljivosti u konceptualnoj fazi konstruiranja glede uspješnosti proizvoda i za razvoj ekološki prihvatljivih proizvoda.

# SADRŽAJ

Podatci za bibliografsku karticu .....	I
Izjava o izvornosti doktorskog rada .....	II
Zahvala .....	III
Sažetak .....	IV
Extended Abstract .....	V
Popis oznaka.....	X
Popis skraćenica .....	XIII
Popis slika .....	XIV
Popis tablica .....	XVII
Predgovor .....	XIX
SADRŽAJ .....	XX
1. UVODNA RAZMATRANJA .....	1
1.1. Uvod u temu istraživanja .....	1
1.2. Motivacija .....	3
1.3. Ciljevi istraživanja i hipoteza istraživanja .....	5
1.4. Metodologija istraživanja .....	9
1.5. Znanstveni doprinosi istraživanja .....	14
1.6. Struktura doktorskog rada.....	16
2. PREGLED PODRUČJA ISTRAŽIVANJA .....	19
2.1. Teorijski okvir istraživanja .....	19
2.1.1. Konstruiranje i razvoj proizvoda.....	19
2.1.2. Konceptualna faza i vrednovanje konceptata.....	22
2.1.3. Ekodizajn .....	24
2.1.4. Životni ciklus proizvoda .....	29
2.1.5. Faktor poboljšanja ekoefikasnosti proizvoda.....	30
2.1.6. Konstruiranje za okoliš .....	33
2.2. Metode i alati za vrednovanje ekološke prihvatljivosti konceptata .....	34
2.2.1. Kvalitativne metode .....	36
2.2.2. Semikvantitativne metode.....	37
2.2.3. Kvalitativno-kvantitativne metode.....	43
2.2.4. Kvantitativne metode .....	45
2.3. Metode procjene utjecaja na okoliš .....	49

2.3.1. Metoda procjene životnog ciklusa ( <i>LCA</i> ) .....	50
2.3.2. Procjena potrošnje energije i materijala u životnom ciklusu proizvoda .....	54
2.4. Rasprava o pregledu literature s područja istraživanja .....	56
3. KVALITATIVNO VREDNOVANJE EKOLOŠKE PRIHVATLJIVOSTI .....	62
3.1. Preliminarna analiza .....	62
3.2. Vrednovanje ekološke prihvatljivosti koncepata .....	64
3.2.1. Smjernice <i>Eco-Design Value</i> [82] i istraživačka pitanja studije .....	67
3.2.2. Sudionici studije slučaja .....	69
3.2.3. Koncepti procesa pranja rublja .....	70
3.2.4. Nacrt i izvođenje studije slučaja .....	76
3.2.5. Rezultati studije slučaja .....	79
3.3. Rasprava o studiji slučaja i zaključci .....	83
4. KRITERIJI I PRIJEDLOG METODE VREDNOVANJA EKOLOŠKE PRIHVATLJIVOSTI .....	85
4.1. Motivacija za razvoj kriterija i metode .....	85
4.2. Metoda vrednovanja .....	90
4.3. Kriteriji ekološke prihvatljivosti predložene metode .....	95
4.3.1. Ekoefektivnost pretvorbi energije i signala .....	96
4.3.2. Broj pretvorbi energije i signala .....	102
4.3.3. Ekološka prihvatljivost sekundarnih efekata na okoliš .....	103
4.3.4. Broj sekundarnih efekata na okoliš .....	105
4.3.5. Broj promjena agregatnog stanja materijala u tehničkom procesu .....	106
4.4. Procedura rangiranja koncepata .....	106
4.5. Primjena metode na primjeru koncepata pranja rublja .....	107
4.5.1. Koncept pranja rublja A .....	109
4.5.2. Koncept pranja rublja B .....	118
4.5.3. Koncept pranja rublja C .....	120
4.5.4. Koncept pranja rublja D <sup>a</sup> .....	123
4.5.5. Koncept pranja rublja E .....	127
4.5.6. Vrednovanje predloženom metodom (koncepti A, B, C, D <sup>a</sup> i E) .....	129
4.6. Ispitivanje konzistentnosti predložene metode zamjenom jednog koncepta iz skupa .....	131
4.6.1. Koncept pranja rublja D <sup>b</sup> .....	131
4.6.2. Vrednovanje predloženom metodom (koncepti A, B, C, D <sup>b</sup> i E) .....	136

4.7. Primjena predložene metode na primjeru koncepta stolnog sata budilice .....	136
4.7.1. Koncept mehaničkog sata budilice .....	138
4.7.2. Koncept mehaničko-digitalnog sata budilice .....	142
4.7.3. Koncept digitalnog sata budilice .....	146
4.7.4. Vrednovanje koncepta stolnog sata budilice predloženom metodom .....	148
4.8. Ograničenja predložene metode .....	153
5. VREDNOVANJE NA TEMELJU PROCJENE ŽIVOTNOG CIKLUSA.....	155
5.1. Uloga procjene životnog ciklusa u provedenom istraživanju.....	155
5.2. <i>LCA</i> metoda .....	156
5.3. Primjena <i>LCA</i> metode na primjeru koncepta iz studije slučaja .....	161
5.3.1. Cilj i opseg procjene životnog ciklusa koncepta .....	161
5.3.2. <i>LCA</i> koncepta pranja rublja A.....	164
5.3.3. <i>LCA</i> koncepta pranja rublja B .....	169
5.3.4. <i>LCA</i> koncepta pranja rublja C .....	173
5.3.5. <i>LCA</i> koncepta čišćenja rublja D <sup>a</sup> i D <sup>b</sup> .....	178
5.3.6. <i>LCA</i> koncepta pranja rublja E .....	180
5.4. Rezultati procjene utjecaja na okoliš i rangiranje koncepta.....	183
6. VALIDACIJA PREDLOŽENE METODE I VERIFIKACIJA ISTRAŽIVANJA .....	189
6.1. Postupak validacije predložene metode .....	189
6.2. Validacija predložene metode.....	191
6.3. Rasprava o ograničenjima predložene metode .....	205
6.4. Smjernice za verifikaciju istraživanja i primjenu predložene metode u praksi .....	208
7. ZAKLJUČAK.....	210
7.1. Rasprava i rezultati istraživanja .....	210
7.2. Obrazloženje znanstvenih doprinosa istraživanja.....	217
7.3. Smjernice budućih istraživanja.....	220
LITERATURA .....	222
Popis programskih alata .....	248
Životopis.....	249
Popis objavljenih radova .....	250
Biography .....	252

# 1. UVODNA RAZMATRANJA

*U uvodnom poglavlju doktorskog rada dan je sažet uvid u provedeno istraživanje. Obrazloženi su motivacija i razlozi za pokretanje istraživanja. Navedeni su istraživačka pitanja i ciljevi istraživanja te je opisana metodologija istraživanja. Znanstveni doprinosi istraživanja jesu kriteriji ekološke prihvatljivosti i razvoj metode vrednovanja ekološke prihvatljivosti konceptijskih rješenja tehničkih sustava. Kriteriji i predložena metoda vrednovanja ekološke prihvatljivosti namijenjeni su vrednovanju ekološke prihvatljivosti u konceptualnoj fazi razvoja tehničkih sustava.*

---

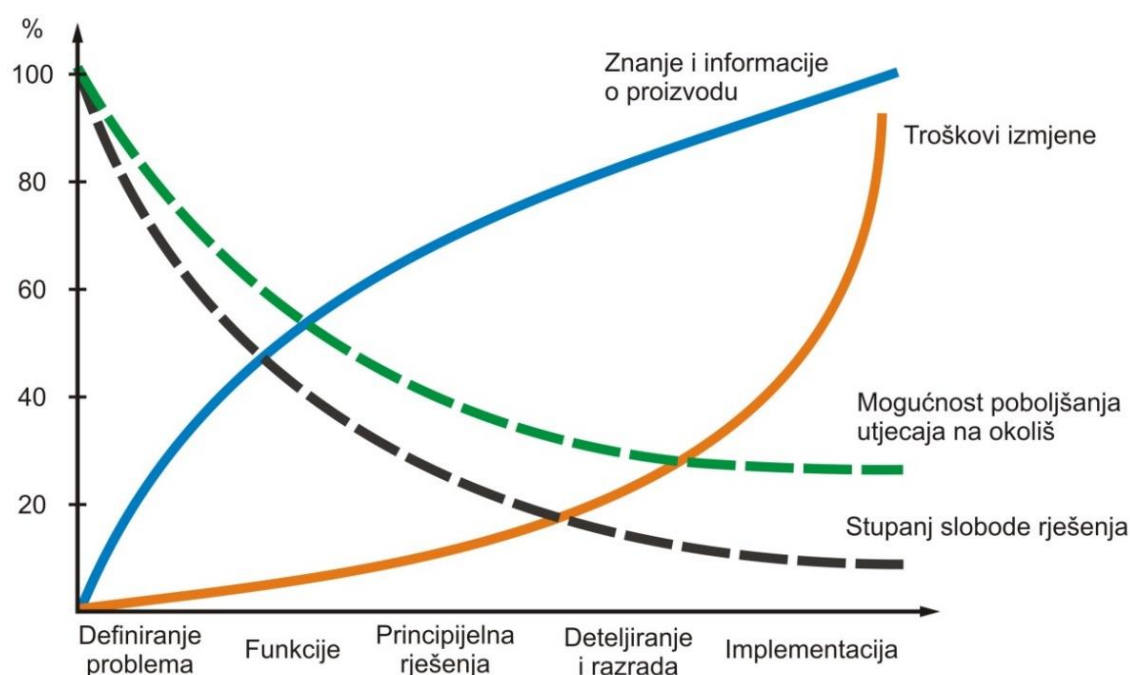
## 1.1. Uvod u temu istraživanja

Odluka o konceptu proizvoda jedna je od najvažnijih odluka u procesu konstruiranja jer se njome definiraju tijek, aktivnosti, sadržaj i smjernice za daljnji razvoj i konstrukcijsku razradu proizvoda, ali i zahtjevi i očekivanja koje proizvod u konačnici treba zadovoljiti. Koncepti osmišljeni u konceptualnoj fazi vrednuju se i međusobno uspoređuju prema kriterijima vrednovanja. Kriteriji vrednovanja jesu korisnički i funkcionalni zahtjevi te drugi pokazatelji kvalitete koncepta proizvoda. Najčešći kriteriji vrednovanja koncepta proizvoda jesu: razina zadovoljenja korisničkih potreba, troškovi, tehnička kompliciranost, pouzdanost tijekom eksploatacije ili rada tehničkog sustava, tehnološki postupci proizvodnje, utjecaji na okoliš te drugi, za poduzeće ili proizvod specifični kriteriji vrednovanja.

Vrednovanjem konstruktori nastoje sagledati koncepte proizvoda koji su kandidati za daljnji razvoj te analizirati njihove karakteristike imajući na umu da odabrano konceptijsko

rješenje mora zadovoljavati određene uvjete ili zahtjeve. Primjerice, konceptijsko rješenje, tj. proizvod, mora biti konkurentan, isplativ, pouzdan, tehnološki izvediv s obzirom na dostupne resurse, resurse u fazi proizvodnje, zatim ekološki prihvatljiv itd. Istraživanje opisano u ovoj disertaciji proučava vrednovanje ekološke prihvatljivosti konceptijskih rješenja proizvoda, tj. tehničkih sustava prema kriterijima ekološke prihvatljivosti.

Odluka o konceptu utječe na mnoge fizička i funkcionalna značajke proizvoda koje će konstruktori odrediti tijekom konstrukcijske razrade. Kada govorimo o ekološkoj prihvatljivosti i utjecajima proizvoda na okoliš, ključne značajke proizvoda jesu potrošnja energije tijekom faze eksploatacije proizvoda, potrošnja energije i materijala u proizvodnji, rastavljivost, reciklabilnost, životni vijek proizvoda u eksploataciji i način odlaganja proizvoda na kraju životnog ciklusa. Nabrojane značajke proizvoda, kao i utjecaj na okoliš koji se kvantificira metodama pri kojima su te značajke ulazni parametri [1], u pravilu se razmatraju tek tijekom konstrukcijske razrade [2].



**Slika 1.1.** Utjecaj odluka na znanje i informacije o proizvodu, troškove izmjena, stupanj slobode rješenja i utjecaje na okoliš [3], [4], [5]

U konceptualnoj fazi razvoja, značajke proizvoda koje su važne za budući utjecaj proizvoda na okoliš moguće je pretpostaviti na temelju dostupnih informacija o konceptu [6], [7]. Mogućnosti poboljšavanja utjecaja proizvoda na okoliš manje su tijekom kasnijih nego tijekom ranijih faza procesa konstruiranja (slika 1.1.). U ranim fazama procesa konstruiranja, kada je konačno rješenje proizvoda okvirno definirano u obliku smjernica, zahtjeva, ideja i



konceptijskih rješenja, postoji veća fleksibilnost implementiranja izmjena na idejnom i konceptijskom rješenju proizvoda radi postizanja ekološki prihvatljivoga rješenja nego što je to slučaj tijekom konstrukcijske razrade.

Brezet [8] i May [9] smatraju da se maksimalna poboljšanja ekоеfikasnosti proizvoda mogu postići ako im se pristupi u ranim fazama konstruiranja, tj. konceptualnoj fazi. Rekonstrukcijom proizvoda moguće je smanjiti utjecaje na okoliš, no ne u tolikoj mjeri kao koncipiranjem za okoliš prihvatljivijega konceptijskog rješenja [10]. Izmjena konceptijskog rješenja u kasnijim, poodmaklim fazama razvoja (npr. tijekom konstrukcijske razrade) implicira porast troškova i kašnjenje razvojnoga procesa [11], [12], [13]. Sukladno tomu, izbor neadekvatnog koncepta ne može se nadomjestiti ili ispraviti u poodmaklim fazama razvoja bez neželjenih posljedica za organizaciju i resurse [14]. Istraživači stoga smatraju da bi vrednovanje ekološke prihvatljivosti i procjenu utjecaja proizvoda na okoliš trebalo provoditi u ranim fazama procesa konstruiranja [15], primjerice u konceptualnoj fazi toga procesa [16], [17], [18].

## 1.2. Motivacija

Odluke donesene u konceptualnoj fazi procesa konstruiranja imaju velik utjecaj na kvalitetu, životni ciklus, utjecaje na okoliš, trajanje procesa razvoja i troškove proizvoda [11], [13], [19]. Smatra se da je slijedom odluka u konceptualnoj fazi definirano oko 70 % troškova i za kvalitetu proizvoda ključnih značajki proizvoda i faktora koji utječu na njihovu kvalitetu [2], [11], [20], [21], [22].

Izborom koncepta proizvoda za daljnje unapređivanje i razvoj definirani su tehnički zahtjevi i specifikacije proizvoda koji u pravilu ostaju nepromijenjeni do kraja procesa konstruiranja [23]. Odluka o konceptu proizvoda jedna je od najvažnijih odluka u procesu konstruiranja i razvoju proizvoda, glede konstrukcijske razrade i proizvodnje [7] te utjecaja na okoliš [19], [24], [25].

Istraživači navode da se 70 do 80 % svih utjecaja proizvoda na okoliš predodređuje nakon završetka ranih faza procesa konstruiranja: u konceptualnoj fazi i u fazi oblikovanja proizvoda [13], [20], [24], [25], [26], [27], [28], [29], [30]. Stoga je važno navrijeme uočiti posljedice odluka o proizvodu koje mogu uzrokovati neprimjereno velik utjecaj proizvoda na okoliš, a prije donošenja odluke o proizvodnji. Ekodizajn i razvoj ekološki prihvatljivih proizvoda najčešće se primjenjuju u kasnijim fazama konstruiranja i razvoja proizvoda, nakon odabira njegova konceptijskoga rješenja. Ekodizajnerski pristup razvoju proizvoda znači

primjenu metoda procjene utjecaja na okoliš, razmatranje potrošnje resursa potrebnih za proizvodnju i procjenu troškova životnog ciklusa proizvoda. Mnoge od tih metoda nisu primarno namijenjene ranim fazama razvoja proizvoda [31], iako su upravo rane faze odlučujuće za uspješnost ekološki prihvatljivih proizvoda na tržištu [32].

Utjecaj proizvoda na okoliš definira se kvantitativno kao zbroj parcijalnih utjecaja na okoliš koji nastaju zbog i tijekom životnog ciklusa proizvoda. Utjecaji proizvoda na okoliš određuju se pokazateljima degradacije okoliša, pretjerane potrošnje prirodnih resursa, te posljedica na ljudsko zdravlje [1]. Pokazatelji utjecaja na okoliš kao što su toksičnost, emisije stakleničkih plinova ili iskorištavanje tla definirani su metodološki kao posljedice okolišnih utjecaja te su predloženi kategorijama utjecaja koje grupiraju zajedničke potencijalne i negativne posljedice utjecaja na okoliš (na zdravlje ljudi, klimatske promjene, iskorištavanje prirodnih resursa, onečišćenje tla, vode, zraka, te biljni i životinjski dio ekosustava). Za procjenu utjecaja na okoliš primjenjuje se metoda *Procjena životnog ciklusa* (engl. *Life Cycle Assessment – LCA*) [1].

Rezultati *LCA* služe za vrednovanje ekološke prihvatljivosti proizvoda te za odlučivanje o njegovu životnom ciklusu. Iako nema metodoloških prepreka koje bi ograničavale primjenu *LCA* metode u pojedinim fazama procesa konstruiranja [33], primjena je *LCA-a* u ranim fazama konstruiranja upitna jer rezultira nepreciznim utjecajima na okoliš budućega proizvoda [21], [34], [35]. U ranim fazama konstruiranja nedostaju informacije o proizvodu: geometrijskim značajkama, strukturi proizvoda i njegovu budućemu životnom ciklusu [5], [35], [36], [37], [38], [39].

Odluka o konceptu proizvoda utječe na mnoga fizička i funkcionalna obilježja proizvoda koje se u konačnici definiraju tek tijekom konstrukcijske razrade [35]. Ta obilježja u literaturi se nazivaju i karakteristikama proizvoda te mogu biti temeljne značajke ključnih sklopova i komponenata proizvoda, značajke određene tehnološkim procesima izrade, mogući načini recikliranja ili ponovne uporabe komponenata proizvoda [12], [18]. Prema uobičajenim modelima procesa konstruiranja i metodologijama konstruiranja ([40], [41]), značajke proizvoda potrebne za kvantifikaciju utjecaja na okoliš nisu dostupne tijekom konceptualne faze. Izbor ekološki neprihvatljivog koncepta teško se može ispraviti kasnije u procesu konstruiranja. Značajne promjene na proizvodu (npr. izmjena konceptijskog rješenja u fazi konstrukcijske razrade) uzrokuju neplanirane troškove i dulji proces razvoja [42].

Nedostatak znanja o konačnim značajkama proizvoda u konceptualnoj fazi jedan je od glavnih razloga teškoćama pri izboru najboljeg koncepta, odnosno koncepta za daljnju

razradu [5]. Iako u ranim fazama procesa konstruiranja postoji najveći potencijal za donošenje odluka u smjeru razvoja ekološki prihvatljivih proizvoda (slika 1.1.), znanje je o budućim značajkama proizvoda ograničeno jer odluke koje su bitne za konačni utjecaj proizvoda na okoliš tek trebaju biti donesene [3], [5], [43]. Smanjivanjem tzv. stupnjeva slobode rješenja tijekom konstruiranja [44], smanjuju se mogućnosti da se intervenira u smislu smanjivanja utjecaja na okoliš. Troškovi implementacije izmjena veći su što je kasnije u procesu izmjena predložena i implementirana [45].

Osim već spomenutog načina vrednovanja ekološke prihvatljivosti proizvoda koji se temelji na kvantificiranju utjecaja na okoliš, u literaturi se spominju i kvalitativne ekodizajnerske metode i alati koji se rabe pri vrednovanju i jednokriterijskom ili višekriterijskom ocjenjivanju ekološke prihvatljivosti konceptijskih rješenja. Pri višekriterijskom ocjenjivanju ekološke prihvatljivosti konceptijskih rješenja, kriteriji ekološke prihvatljivosti mogu biti međusobno kontradiktorni i nepoznatih težinskih faktora [46].

Semikvantitativne ekodizajnerske metode i alati također se koriste kvalitativnim kriterijima ekološke prihvatljivosti uz uvođenje kvantitativnih vrijednosnih ljestvica. U tu svrhu rabe se inačice metode *Kuća kvalitete* (engl. *Quality Function Deployment – QFD*) [47]. Iako je riječ o dobro poznatim i često primjenjivanim metodama u industriji, istraživači navode da inačice *QFD* metode nisu potpuno prilagođene vrednovanju ekološke prihvatljivosti u fazi koncipiranja te da zanemaruju vrednovati ekološku prihvatljivost s obzirom na fazu eksploatacije proizvoda [48], [49].

Primjenjivost metoda vrednovanja ekološke prihvatljivosti u konceptualnoj fazi predmet je proučavanja u istraživanjima [50], [51]. Kvalitativne su metode vrednovanja subjektivne. To znači da njihova primjena zahtijeva da konstruktori posjeduju specifična znanja ili iskustva o tome kako interpretirati kriterije ekološke prihvatljivosti. Kvantitativne su metode složene za uporabu te se ne mogu primjenjivati u konceptualnoj fazi razvoja proizvoda, kada nedostaju ključne značajke proizvoda, detalji o njegovu životnom ciklusu i kada još nije odlučeno o specifikacijama proizvoda [52], [53].

### 1.3. Ciljevi istraživanja i hipoteza istraživanja

U istraživanjima na temu vrednovanja ekološke prihvatljivosti u konceptualnoj fazi procesa konstruiranja nema univerzalne definicije konceptijskoga rješenja proizvoda. Definicije variraju od ideje proizvoda [54], [55], [56], do *predefiniranih* koncepata proizvoda [12], [57], [58]. U recentnim se istraživanjima proučavaju metode i pristupi vrednovanja

ekološke prihvatljivosti koji bi se mogli primjenjivati u ranim fazama konstruiranja te se teži razvoju novih metodologija i metoda kojima bi se omogućila procjena utjecaja na okoliš u konceptualnoj fazi [25], [35], [38], [52], [59], [60], [61], [62].

Za potrebe vrednovanja ekološke prihvatljivosti koncepata na temelju procjene utjecaja na okoliš, potrebno je poznavati geometrijske značajke proizvoda kojima se opisuje struktura proizvoda, listu materijala proizvoda, tehnološke postupke proizvodnje te parametre životnog ciklusa proizvoda. O navedenim značajkama proizvoda koje upućuju na utjecaj na okoliš proizvoda, u pravilu, u konceptualnoj fazi nema podataka, pa ih je potrebno pretpostaviti na temelju usporedbe s utjecajima na okoliš sličnih, već komercijalnih proizvoda, koji se nazivaju referentnim proizvodima [18], [60], [62]. U takvim slučajevima, obično se rezultati procjene ne uporabljaju pri odlučivanju o konceptu proizvoda, nego kao smjernice inkrementalnih izmjena na proizvodu pri njegovoj rekonstrukciji [52].

Pri kvalitativnom vrednovanju ekološke prihvatljivosti kriteriji ekološke prihvatljivosti implicitno su definirani, a vrednovanje se provodi na temelju pretpostavki o konačnim obilježjima proizvoda i njegova životnog ciklusa. Kada kriteriji ekološke prihvatljivosti nisu eksplicitno izraženi, vrednovanje je podložno subjektivnoj interpretaciji ekološke prihvatljivosti koncepata koju daju konstruktori [63]. Potonja je tvrdnja ispitana istraživanjem u kojemu su magistri inženjeri strojarstva proveli vrednovanje ekološke prihvatljivosti konceptijskih rješenja pranja rublja.

Ciljevi provedenog istraživanja definirani su na temelju pregleda literature o ograničenjima postojećih metoda i alata za vrednovanje ekološke prihvatljivosti u konceptualnoj fazi razvoja tehničkih sustava.

Ciljevi istraživanja opisanog u ovoj disertaciji jesu:

1. odrediti kriterije ekološke prihvatljivosti za vrednovanje ekološke prihvatljivosti u konceptualnoj fazi razvoja tehničkih sustava,
2. razvoj metode vrednovanja ekološke prihvatljivosti za konceptualnu fazu razvoja tehničkih sustava,
3. ispitati jesu li i na koji način kriteriji i metoda vrednovanja ekološke prihvatljivosti definirani provedenim istraživanjem primjenjivi za vrednovanje ekološke prihvatljivosti u konceptualnoj fazi razvoja tehničkih sustava.

U svrhu ostvarenja ciljeva istraživanja razvijeni su kriteriji ekološke prihvatljivosti konceptijskih rješenja tehničkih sustava ([69], [71]). Kriteriji ekološke prihvatljivosti implementirani su u metodi vrednovanja ekološke prihvatljivosti za konceptualnu fazu razvoja tehničkih sustava [83]. Ti kriteriji i predložena metoda čine teorijski i praktični doprinos istraživanja. Razvojem kriterija i metode vrednovanja ekološke prihvatljivosti za konceptualnu fazu procesa konstruiranja omogućuje se vrednovanje ekološke prihvatljivosti konceptijskih rješenja generiranih u konceptualnoj fazi razvoja tehničkih sustava. Vrednovanje ekološke prihvatljivosti koncepata tehničkih sustava predloženom metodom ne zahtjeva dodatno prikupljanje podataka o radnim principima jednakih ili oblikom i strukturom sličnih proizvoda na tržištu ili podataka potrebnih za kvantificiranje utjecaja proizvoda na okoliš *LCA* metodom.

Koncepcijska rješenja koja se razmatraju pri izboru koncepta proizvoda koji će ući u proces daljnje razrade i detaljiranja, mogu se znatno razlikovati u funkcijskim strukturama i načinima ostvarivanja glavne i sporednih funkcija proizvoda te fizikalnim efektima koje isporučuju. Prema teoriji tehničkih sustava [64], [65], [66], proizvodi su tehnički artefakti (tehnički sustavi) koji transformiraju operande kojima je određen tehnički proces. Koncepcijskim rješenjem tehničkog sustava određeni su fizikalni efekti, principijelna rješenja parcijalnih funkcija kojima se ostvaruje zadana funkcija proizvoda, te funkcijska struktura proizvoda. Varijantnost konceptijskih rješenja postiže se variranjem tehničkih rješenja proizvoda, koji su, prema teoriji tehničkih sustava [64], opisani tehničkim procesima i tehnologijom u svrhu ostvarivanja fizikalnih efekata i funkcija proizvoda.

Prema Kroesu [67], doprinos teorije tehničkih sustava razvoju znanosti o konstruiranju jest u uobličenju i sistematizaciji znanja i procedura pri konstruiranju u jedinstvenoj metodologiji konstruiranja. Teorija tehničkih sustava teorijski je okvir ovog istraživanja te referentni okvir za postavljanje hipoteze istraživanja. Teorijom tehničkih sustava definiran je kontekst u kojemu se pristupa konstruiranju i analizi proizvoda (tehničkih sustava) te odnos između tehničkoga procesa i okoliša [68].

Sukladno teoriji tehničkih sustava [64] definirana je hipoteza istraživanja:

**kriteriji ekološke prihvatljivosti konceptijskih rješenja tehničkih sustava mogu se odrediti na temelju značajki transformacija energije, materijala i signala u tehničkom procesu.**

Vrednovanje ekološke prihvatljivosti u istraživanju prikazanom u ovom radu temelji se na razmatranju značajki transformacija energije, materijala i signala u tehničkome procesu [65]. Te su značajke poznate na temelju prethodno definiranih tehničkih procesa, tehnologija transformacije energije, materijala i signala u tehničkim procesima, radnih principa tehničkog sustava te fizikalnih efekata [67]. Podatci potrebni za vrednovanje proizlaze iz analize lanaca fizikalnih efekata i sekundarnih efekata na okoliš [69]. Vrednovanje ekološke prihvatljivosti u konceptualnoj fazi razvoja tehničkih sustava temelji se na kriterijima ekološke prihvatljivosti razvijenima u provedenom istraživanju i detaljno objašnjenima u ovome doktorskom radu.

Prvi par kriterija ekološke prihvatljivosti čine kriterij ekoefektivnosti pretvorbi energije i signala u tehničkom procesu i kriterij broja pretvorbi energije i signala u tehničkom procesu. Ta dva kriterija ekološke prihvatljivosti definirana su kako bi se omogućilo vrednovanje značajki transformacija energije i signala u tehničkom procesu. Prvi se kriterij odnosi na vrednovanje prema kriteriju kvalitete pretvorbe energije koji proizlazi iz tzv. hijerarhije oblika energije [70]. Za fizikalne efekte kojima se realiziraju parcijalne funkcije ili varijante parcijalnih funkcija koncepta, moguće je odrediti kvalitetu pretvorbe oblika energije [71], što je u ovom radu jedan od ukupno pet kriterija ekološkog vrednovanja. Temeljne znanstvene postavke za razvoj kriterija ekoefektivnosti pretvorbi energije i signala proizlaze iz istraživanja o ekvivalentnim solarnim jedinicama oblika energije koje je proveo Odum [70]. Drugi kriterij ekološke prihvatljivosti razvijen u sklopu provedenog istraživanja jest broj pretvorbi energije i signala, a proizlazi iz literature i smjernica za razvoj ekološki prihvatljivih konceptijskih rješenja koje su definirali Pahl i drugi [72].

Drugi par kriterija ekološke prihvatljivosti odnosi se na vrednovanje značajki transformacija materijala u tehničkome procesu putem vrednovanja ekološke prihvatljivosti sekundarnih efekata na okoliš. Kriterij ekološke prihvatljivosti sekundarnih efekata na okoliš i kriterij broja sekundarnih efekata na okoliš služe vrednovanju vrste i broja sekundarnih (latentnih) efekata na okoliš. Sekundarni (latentni) efekti na okoliš najbliži su definiciji neposrednih utjecaja na okoliš tehničkog sustava u konceptualnoj fazi [68], [69], [73]. Vrednovanje je sekundarnih efekata na okoliš kvalitativno, a temelji se na vrednovanju značajki sekundarnih efekata na okoliš kao što su neškodljivost za korisnike i okoliš, toksičnost, vrsta emisija prema okolišu i drugi. Kriterij ekološke prihvatljivosti sekundarnih efekata na okoliš definiran je na temelju literature o vrstama otpada i prema smjernicama za ekološki prihvatljivo gospodarenje otpadom [74], [75], [76].

Pahl i drugi [72] postavili su teorijske osnove za razvoj kriterija broj promjena agregatnoga stanja materijala u tehničkome procesu, a to je u ovom istraživanju peti predloženi kriterij ekološke prihvatljivosti. Taj kriterij ekološke prihvatljivosti namijenjen je vrednovanju značajki transformacija materijala u tehničkome procesu.

Kriteriji ekoefektivnost pretvorbi energije i signala u tehničkom procesu, broj pretvorbi energije i signala u tehničkome procesu, ekološka prihvatljivost sekundarnih efekata na okoliš, broj sekundarnih efekata na okoliš te broj promjena agregatnoga stanja materijala u tehničkom procesu služe vrednovanju ekološke prihvatljivosti konceptijskih rješenja. Kako bi se omogućilo vrednovanje ekološke prihvatljivosti koncepata i njihovo rangiranje prema ekološkoj prihvatljivosti te u konceptualnoj fazi konstruiranja i razvoja proizvoda, u sklopu istraživanja razvijena je predložena metoda. Predložena metoda određuje aktivnosti prema kojima se provode vrednovanje i rangiranje konceptijskih varijanti u konceptualnoj fazi. Predložena se metoda primjenjuje za vrednovanje ekološke prihvatljivosti konceptijskih rješenja tzv. diskretnih tehničkih sustava, što znači da nije namijenjena vrednovanju artefakata poput hrane, maziva ili drugih netehničkih artefakata. Nadalje, predložena metoda nije namijenjena vrednovanju ekološke prihvatljivosti kompleksnih tehničkih sustava i njihovih koncepata.

Ograničenje predložene metode jest u tome što pretpostavlja poznavanje glavnih funkcionalnih i tehničkih obilježja, tj. značajki konceptijskih rješenja koja se razmatraju i vrednuju. Koncepti koji se vrednuju prema ekološkoj prihvatljivosti mogu biti prethodno osmišljeni u poduzeću u kojemu će se realizirati njihov daljnji razvoj, ili može biti riječ o konceptima proizvoda konkurenata.

Svaka analiza koncepata proizvoda zahtijeva visoki stupanj poznavanja radnih principa i funkcionalnih značajki koncepata proizvoda koji su predmet analize. Ako razrada konceptijskih rješenja nije na stupnju da je konstruktorima uz raspoložive resurse i informacije o konceptu moguće ustanoviti radne principe, tjekeve energije, materijala i signala, fizikalne efekte, lance fizikalnih efekata i sekundarne efekte na okoliš, primjena predložene metode zahtijevat će dodatne resurse glede vremena potrebnog za analizu koncepata i prikupljanje podataka o konceptima.

### **1.4. Metodologija istraživanja**

Istraživači kao odgovor na problem vrednovanja ekološke prihvatljivosti proizvoda u konceptualnoj fazi predlažu: 1) primjenu metoda i alata ekodizajna, 2) razvoj metodologija

koje bi omogućivale procjenu utjecaja proizvoda na okoliš u konceptualnoj fazi razvoja, i 3) ekodizajnerski pristup oblikovanju ekološki prihvatljivih proizvoda. Ideja je da se nakon završetka vrednovanja predlože alternative koje bi bile ekološki prihvatljivije uzimajući u obzir ishode vrednovanja. Verifikacija u radu prikazanog istraživanja provodi se kvalitativnim metodama na temelju rezultata studija (studije slučaja i studije ekološke prihvatljivosti konceptijskih rješenja na temelju metode procjene utjecaja na okoliš) te validacijom kriterija i predložene metode vrednovanja ekološke prihvatljivosti s pomoću metode *Validacijski kvadrat* [77].

Kriteriji ekološke prihvatljivosti i predložena metoda vrednovanja ekološke prihvatljivosti za konceptualnu fazu razvoja tehničkih sustava glavni su teorijski znanstveni doprinos provedenog istraživanja. Kriteriji i predložena metoda ispitani su usporedbom s ishodima vrednovanja na temelju procjene životnog ciklusa proizvoda (*LCA*) [1]. Validacija efektivnosti i efikasnosti kriterija i metode temelji se na usporedbi s *LCA* rezultatima vrednovanja relevantnih slučajeva (konceptata pranja rublja i konceptata stolnog sata budilice), a na temelju *LCA* analize utjecaja konceptata na okoliš.

Metodologija i izlaganje rezultata provedenog istraživanja temelji se na općoj metodologiji istraživanja u znanosti o konstruiranju (engl. *Design research methodology – DRM*) [78] prema kojoj su definirani koraci istraživanja. Plan istraživanja sastavljen je prema smjernicama priručnika za metodologiju istraživačkog rada [79]. Istraživanje opisano u ovoj disertaciji sastoji se od četiriju koraka: Preliminarno istraživanje, Razvoj kriterija ekološke prihvatljivosti i predložene metode vrednovanja, Ispitivanje konzistentnosti, učinkovitosti i primjenjivosti predložene metode i Optimizacija predložene metode i vrednovanje istraživanja (slika 1.2.).



**Slika 1.2.** Koraci provedenog istraživanja



### I. Preliminarno istraživanje

Preliminarnim se istraživanjem analizira literatura na temu vrednovanja ekološke prihvatljivosti u konceptualnoj fazi procesa konstruiranja. Preliminarno istraživanje sastoji se od: pregleda literature, postavljanja istraživačkih pitanja, studije slučaja i analize rezultata studije. Pregled literature obuhvaća radove na temu ekodizajna u konceptualnoj fazi procesa konstruiranja i razvoja proizvoda. Motivacija i teorijski okvir istraživanja obrazlažu se objašnjavanjem i kritičkim osvrtom na teorije i metodologije relevantne za analizu problema istraživanja [79], [80].

Na temelju motivacija ustanovljenih pregledom literature stručne i znanstvene literature o ekodizajnu pri konstruiranju i razvoju proizvoda definirana su tri istraživačka pitanja:

1. Koja su ograničenja postojećih metoda i alata vrednovanja ekološke prihvatljivosti, te koja su ograničenja primjene tih metoda i alata u konceptualnoj fazi razvoja tehničkih sustava?
2. Koji su kriteriji ekološke prihvatljivosti koji se mogu primjenjivati pri vrednovanju ekološke prihvatljivosti tehničkih sustava u konceptualnoj fazi razvoja tehničkih sustava?
3. Kako vrednovati ekološku prihvatljivost tehničkih sustava u konceptualnoj fazi razvoja tehničkih sustava?

Uvidom u literaturu u užem području istraživanja analiziraju se metode i alati ekodizajna koji se primjenjuju za vrednovanje ekološke prihvatljivosti i procjenu utjecaja na okoliš u konceptualnoj fazi procesa konstruiranja. Analiziraju se obilježja i ograničenja primjene metoda i alata za vrednovanje ekološke prihvatljivosti u konceptualnoj fazi. Sa svrhom proučavanja fenomena vrednovanja ekološke prihvatljivosti u konceptualnoj fazi razvoja tehničkih sustava i putem kvalitativnih metoda vrednovanja, provedena je studija slučaja [63], [81]. U studiji slučaja jedanaest (11) magistara inženjera strojarstva imalo je zadatak vrednovati ekološku prihvatljivost konceptijskih varijanti, prvo bez eksplicitno propisanih kriterija ekološke prihvatljivosti, a zatim na temelju eksplicitno propisanih kriterija ekološke prihvatljivosti koji su definirani smjernicama *Eco-Design Value* [82]. Vrednovanje koncepata tehničkih sustava (proizvoda) uobičajeno se provodi u specifičnom sociotehničkom, vremenskom i prostornom okruženju, stoga su analizom studije slučaja ustanovljena temeljna obilježja *jediničnog sustava* [79].

Pregled literature vođen je sa svrhom davanja odgovora na 1. istraživačko pitanje o ograničenjima metoda i alata ekodizajna i njihove primjene za vrednovanje ekološke prihvatljivosti u konceptualnoj fazi razvoja tehničkih sustava. Pregledom literature ustanovljeno je koje se metode i alati ekodizajna rabe za vrednovanje ekološke prihvatljivosti te se mogu primijeniti u konceptualnoj fazi razvoja proizvoda.

### II. Razvoj kriterija ekološke prihvatljivosti i predložene metode vrednovanja ekološke prihvatljivosti za konceptualnu fazu razvoja tehničkih sustava

Metodološki pristup za realizaciju ciljeva istraživanja proizlazi iz pregleda literature o vrednovanju ekološke prihvatljivosti u konceptualnoj fazi razvoja tehničkih sustava i analize rezultata studije vrednovanja ekološke prihvatljivosti koncepata proizvoda [81]. Rezultati preliminarnog istraživanja usmjerili su nastavak istraživanja prema razvoju kriterija ekološke prihvatljivosti konceptijskih rješenja tehničkih sustava i predložene metode vrednovanja ekološke prihvatljivosti. Utjecajni faktori (tzv. ključni faktori [78]), koji su temelj za validaciju kriterija i predložene metode, proizašli su iz analize primjera vrednovanja ekološke prihvatljivosti koncepata pranja rublja i ograničenja studije slučaja [81].

Razmatranjem 2. istraživačkog pitanja o prikladnosti kriterija ekološke prihvatljivosti i predložene metode potrebama konceptualne faze razvoja tehničkih sustava osmišljena je metodologija provjere hipoteze istraživanja. Validaciju kriterija i predložene metode čini provjera konzistentnosti i učinkovitosti kriterija i predložene metode [77].

### III. Ispitivanje konzistentnosti, učinkovitosti i primjenjivosti kriterija i predložene metode vrednovanja ekološke prihvatljivosti za konceptualnu fazu razvoja tehničkih sustava

U skladu s ciljevima istraživanja, provedena je validacija primjenjivosti kriterija ekološke prihvatljivosti i predložene metode vrednovanju ekološke prihvatljivosti konceptijskih rješenja tehničkih sustava. Prema uzoru na validaciju metoda *Validacijskim kvadratom* [77] provjeravaju se logička i strukturna konzistentnost te relevantnost i učinkovitost kriterija ekološke prihvatljivosti i predložene metode. Provjera učinkovitosti kriterija i metode provedena je usporedbom s vrednovanjem smjernicama *Eco-Design Value* [82] u studiji slučaja ([63], [81]) i usporedbom s vrednovanjem temeljenom na procjeni životnog ciklusa (*LCA*) koncepata proizvoda [83]. Validacija kriterija i predložene metode specifični su zbog njihove namjene (konceptualna faza razvoja tehničkih sustava) i zahtjeva glede validacije ekodizajnerskih metoda i alata [84].

Blessing i Chakrabarti [78] opisuju važnost validacije u području konstruiranja i razvoja proizvoda, daju smjernice za validaciju potpore konstruiranju i razvoju proizvoda te ishoda istraživanja u ovome znanstvenom području. Verifikacija (vrednovanje) istraživanja također je provedena prema smjernicama *DRM* metodologije [78].

Verifikacija istraživanja uključuje verifikaciju podataka pri validaciji kriterija i predložene metode, analizu ograničenja predložene metode, analizu primjenjivosti kriterija i predložene metode u konceptualnoj fazi razvoja tehničkih sustava, analizu kompatibilnosti kriterija i predložene metode i kvalitativnih i semikvantitativnih metoda i alata ekodizajna za konceptualnu fazu te vrednovanje kriterija i predložene metode na primjeru vrednovanja ekološke prihvatljivosti koncepta stolnog sata budilice. Nadalje, verifikacija uključuje razmatranje istraživačkih pitanja, hipoteze, te analizu aktivnosti i mogućih situacija u kojoj se kriteriji i predložena metoda mogu primijeniti.

Provjera hipoteze obuhvaća provjeru ispravnosti znanstvenih tvrdnji, usporedbu rezultata vrednovanja ekološke prihvatljivosti testnih koncepta na oglednim primjerima s pomoću u radu predloženih kriterija i predložene metode, usporedbu rezultata vrednovanja u studiji slučaja ([63], [81]), te usporedbu rezultata vrednovanja ekološke prihvatljivosti na temelju procjene utjecaja na okoliš [83].

Radi detaljnijeg istraživanja problema vrednovanja ekološke prihvatljivosti u konceptualnoj fazi razvoja tehničkih sustava i validacije predložene metode, provedena je procjena životnog ciklusa konceptijskih rješenja pranja rublja. Ekološku prihvatljivost tijekom procesa konstruiranja i razvoja proizvoda moguće je ustanoviti vodeći se rezultatima procjene životnoga ciklusa proizvoda (*LCA*) [1]. Procjena utjecaja na okoliš omogućila je *post factum* analizu ekološke prihvatljivosti razmatranih koncepta jer u konceptualnoj fazi procesa konstruiranja uobičajeno nedostaju ključne informacije o proizvodu i njegovu životnom ciklusu na temelju kojih bi se provela procjena životnog ciklusa proizvoda na standardom propisan način [38], [85]. Rezultati procjene životnoga ciklusa prikazani su u četvrtom poglavlju ove disertacije.

Utjecaji na okoliš procjene životnog ciklusa koncepta pranja rublja prikazani su s pomoću metode *ReCiPe*<sup>TM</sup> [86] kojom su propisane kategorije utjecaja na okoliš i metoda kvantifikacije utjecaja na okoliš. Za analizu podataka o procesima životnog ciklusa rabljen je softver *SimaPro*<sup>TM</sup> [87] te podatci o procesima iz *Ecoinvent*<sup>TM</sup> baze podataka za razvoj inventara materijala i energije u životnome ciklusu proizvoda [88], [89]. U konačnici su rezultati procjene životnog ciklusa uspoređeni s rezultatima studije slučaja i rezultatima

vrednovanja ekološke prihvatljivosti u ovim istraživanjem predloženom metodom vrednovanja ekološke prihvatljivosti konceptijskih rješenja tehničkih sustava. Validacija predložene metode provedena je prema metodi za validaciju metoda naziva *Validacijski kvadrat* [77] koja propisuje ispitivanje teorijske i empirijske konzistentnosti i učinkovitosti metoda u području primjene konstruiranja i razvoja proizvoda.

### IV. Optimizacija predložene metode vrednovanja ekološke prihvatljivosti

U zaključnom koraku istraživanja daju se preporuke za primjenu predložene metode u praksi, prijedlog nacrtu studije za sveobuhvatniju validaciju kriterija i predložene metode te smjernice za buduća istraživanja. U raspravi o istraživanju obrazložene su pretpostavke istraživanja i analizirani rezultati istraživanja sa svrhom vrednovanja ishoda istraživanja i objašnjenja znanstvenih doprinosa istraživanja. Rasprava o rezultatima obuhvaća teorijske i praktične aspekte primjene predloženoga pristupa vrednovanju ekološke prihvatljivosti u konceptualnoj fazi razvoja tehničkih sustava. Objašnjena je optimizacija predložene metode vrednovanja ekološke prihvatljivosti te su dane preporuke za primjenu kriterija i predložene metode u praksi.

## **1.5. Znanstveni doprinosi istraživanja**

Razvoj istraživanja u području konstruiranja i razvoja proizvoda temelji se na analizama i kritičkom preispitivanju uvriježenih teorijskih postavki i modela procesa konstruiranja, istraživanju praktične primjene metodologija, metoda i alata u industriji te ponovljivosti empirijskih istraživanja i studija. Uzimajući u obzir obilježja metoda te prednosti i ograničenja vrednovanja ekološke prihvatljivosti u konceptualnoj fazi procesa konstruiranja, doprinos prikazanoga istraživanja očituje se razvojem kriterija ekološke prihvatljivosti i metode za vrednovanje ekološke prihvatljivosti konceptijskih rješenja tehničkih sustava.

Predložena se metoda temelji na pet kriterija ekološke prihvatljivosti te na rangiranju prema metodi sume rangova [90]. Kriteriji ekološke prihvatljivosti konceptijskih rješenja te predložena metoda vrednovanja za konceptualnu fazu udovoljavaju zahtjevima za kvalitativnim vrednovanjem konceptijskih rješenja u ranim fazama procesa konstruiranja. U ranim fazama konstruiranja nisu zadovoljeni preduvjeti za vrednovanje ekološke prihvatljivosti na temelju kvantitativnih metoda procjene utjecaja na okoliš zbog nedovoljnih ili nedostupnih podataka o konceptima, referentnim proizvodima i njihovim utjecajima na okoliš. S druge strane, vrednovanje na temelju kvalitativnih metoda vrednovanja subjektivno

je i time podložno interpretaciji ekološke prihvatljivosti konceptata proizvoda, što je pokazano studijom slučaja u prvom koraku istraživanja.

Znanstveni doprinosi istraživanja prikazanog u ovome doktorskom radu jesu:

### I. Teorijski doprinos

Teorijski je doprinos ostvaren razvojem kriterija ekološke prihvatljivosti konceptijskih rješenja tehničkih sustava i metodom vrednovanja ekološke prihvatljivosti za konceptualnu fazu razvoja tehničkih sustava. Razvijeni kriteriji ekološke prihvatljivosti u literaturi su bili implicitno naznačeni kao potencijalni kriteriji vrednovanja proizvoda, no nisu bili formalizirani u eksplicitnom obliku kao kriteriji ekološke prihvatljivosti niti formalizirani u metodi vrednovanja konceptata proizvoda.

Kriteriji ekološke prihvatljivosti razvijeni ovim istraživanjem implementirani su u metodi vrednovanja ekološke prihvatljivosti za konceptualnu fazu razvoja tehničkih sustava, te je time i formalizirana njihova primjenjivost u konceptualnoj fazi procesa konstruiranja. Potvrdom hipoteze ostvarene su nove znanstvene spoznaje o kriterijima ekološke prihvatljivosti tehničkih sustava (proizvoda), čime se pridonosi stvaranju novih znanja u domeni teorije tehničkih sustava [65], ekodizajnu pri konstruiranju i metodama potpore razvoju ekološki prihvatljivih proizvoda.

### II. Doprinos metodologijama

Doprinos metodologijama očituje se u razvoju metodološkog okvira za validaciju kriterija ekološke prihvatljivosti i predložene metode. U istraživanju prikazanu u ovoj disertaciji kriteriji i metoda vrednovanja ekološke prihvatljivosti za konceptualnu fazu razvoja tehničkih sustava čine glavne znanstvene doprinose istraživanja i oblik su potpore konstruiranju i razvoju tehničkih sustava (proizvoda). S obzirom na to da je validacija kriterija i predložene metode na temelju ishoda implementacije kriterija i metode u realnom okruženju u industriji te kroz dulji period teško provediva, Blessing i Chakrabarti [78] ostavljaju mogućnost provedbe tzv. *inicijalne* validacije. Ovakav tip validacije proveden je u istraživanju prikazanom u ovoj disertaciji. Vrednovanje kriterija i predložene metode temeljeno je na provjeri teorijske i empirijske konzistentnosti i učinkovitosti kriterija i metode, a prema smjernicama za validaciju metoda konstruiranja [77].

Vrednovanje teorijske i empirijske konzistentnosti [77] kriterija i predložene metode temeljeno je na provjeri valjanosti konstruktivnih elemenata koji čine kriterije i predloženu

metodu, analizi informacijskog tijeka vrednovanja prema kriterijima i informacijskoga tijeka predložene metode te provjeri primjera koji su odabrani za ogledne primjere konceptata kakvi mogu biti predmet razmatranja u industriji i realnom okruženju razvojnih poduzeća. Teorijsku i empirijsku učinkovitost kriterija i predložene metode moguće je ispitati na primjerima koji su općenito primjenjivi u konceptualnoj fazi procesa konstruiranja, ali i relevantni s obzirom na svrhu kriterija i metode da se primjenjuju za vrednovanje ekološke prihvatljivosti u konceptualnoj fazi. Provjera empirijske učinkovitosti kriterija i predložene metode temelji se na analizi pokazatelja kao što su kvaliteta, troškovi i resursi [77]. Empirijska konzistentnost i teorijska učinkovitost kriterija i predložene metode provjereni su usporedbom s metodom vrednovanja ekološke prihvatljivosti ekodizajnerskim smjernicama u studiji slučaja ([63], [81]) i usporedbom vrednovanja ekološke prihvatljivosti procjenom životnog ciklusa (LCA) [83].

### III. Praktični doprinos

Praktični se doprinos očituje razvojem kriterija ekološke prihvatljivosti i predložene metode vrednovanja ekološke prihvatljivosti u konceptualnoj fazi razvoja tehničkih sustava. Time se i formalno ostvaruje doprinos aktivnostima vrednovanja ekološke prihvatljivosti u konceptualnoj fazi procesa konstruiranja i razvoju proizvoda.

## 1.6. Struktura doktorskog rada

U **poglavlju 1.** obrazlažu se razlozi pokretanja istraživanja na temu vrednovanja ekološke prihvatljivosti u konceptualnoj fazi razvoja tehničkih sustava (proizvoda). Daje se uvid u važnost aktivnosti vrednovanja ekološke prihvatljivosti u konceptualnoj fazi konstruiranja i razvoja proizvoda. Izlaže se motivacija za razvoj metode za vrednovanje ekološke prihvatljivosti u konceptualnoj fazi razvoja tehničkih sustava. Daje se pregled najvažnijih zaključaka iz najistaknutijih istraživanja iz pregleda literature o području istraživanja. Istraživanje se opisuje tako da se iznose ciljevi istraživanja i hipoteza. Opisuje se metodologija istraživanja te objašnjenje četiriju koraka metodologije u radu prikazanog istraživanja. U uvodnim se razmatranjima ukratko navode metode primjenjivane u istraživanju i njegovi znanstveni doprinosi.

Pregled područja istraživanja sastoji se od teorijskog okvira istraživanja na temelju kojeg su opisane glavne ideje, koncepti i teorije u području istraživanja. U **poglavlju 2.** daju se pregled procesa konstruiranja i opis konceptualne faze procesa konstruiranja. Obrazlaže se

motivacija istraživanja. U poglavlju se opisuju metode ekodizajna i pristupi konstruiranju za okoliš koji se primjenjuju tijekom faza oblikovanja i detaljiranja proizvoda. U spomenutom se poglavlju objašnjavaju pojmovi ekoefikasnost i ekoefektivnost te se daje objašnjenje strategija poboljšanja utjecaja proizvoda. Strategije poboljšanja utjecaja proizvoda na okoliš jesu poboljšanje proizvoda, rekonstrukcija, razvoja novog koncepta i razvoj sustava proizvoda i usluga. U pregledu teorijskih i metodoloških pristupa vrednovanju ekološke prihvatljivosti proizvoda opisuju se obilježja i ograničenja metoda koje se primjenjuju u tu svrhu. U pregledu literature područja istraživanja analizirane su metode i alati za vrednovanje ekološke prihvatljivosti u konceptualnoj fazi procesa konstruiranja. Poglavlje završava kritičkim osvrtom na primjenu metoda procjene životnoga ciklusa proizvoda (*LCA*) tijekom procesa konstruiranja.

**Poglavlje 3.** odnosi se na analizu rezultata preliminarnog istraživanja u kojemu se analiziraju metode kvalitativnoga vrednovanja ekološke prihvatljivosti namijenjene konceptualnoj fazi razvoja tehničkih sustava. Izlažu se motivacija i razlozi zbog kojih su u preliminarnom dijelu istraživanja analizirane upravo kvalitativne metode vrednovanja ekološke prihvatljivosti konceptata proizvoda. U preliminarnom dijelu istraživanja provedena je studija slučaja u kojoj su konstruktori imali zadatak vrednovati ekološku prihvatljivost konceptata. U prvom koraku studije kriteriji ekološke prihvatljivosti nisu bili propisani, a u drugom koraku studije ispitanici su bili upućeni na to da se koriste kriterijima ekološke prihvatljivosti koji se temelje na smjernicama ekodizajna za ekološki prihvatljivo oblikovanje proizvoda. Ovo poglavlje donosi istraživačka pitanja, nacrt studije slučaja, opis testnih konceptijskih rješenja, analizu rezultata studije slučaja i obrazloženje zaključaka o primjenjivosti postojećih kvalitativnih metoda i alata ekodizajna u konceptualnoj fazi razvoja tehničkih sustava. Opisan je tijek izvođenja studije, te prikazani rezultati vrednovanja konceptata pranja rublja. Rezultati studije slučaja i važnost studije za provedeno istraživanje objašnjeni su u raspravi. Poglavlje završava zaključkom i kritičkim osvrtom na kriterije ekološke prihvatljivosti propisane metodama kojima se vrednovanje ekološke prihvatljivosti provodi na kvalitativan način.

U **poglavlju 4.** prezentirani su kriteriji ekološke prihvatljivosti i objašnjena je predložene metoda vrednovanja ekološke prihvatljivosti za konceptualnu fazu razvoja tehničkih sustava. Predložena se metoda temelji se na kriterijima ekološke prihvatljivosti koji su također razvijeni u sklopu provedenog istraživanja. U poglavlju je dano objašnjenje teorijskih postavki koja su usmjerivala razvoj kriterija i predložene metode. Procedura

vrednovanja predloženom metodom objašnjena je na dvama primjerima: vrednovanju ekološke prihvatljivosti koncepata triju satova budilica i šest koncepata pranja rublja. Poglavlje završava pregledom zahtjeva za validaciju konzistentnosti, učinkovitosti i primjenjivosti metode vrednovanja ekološke prihvatljivosti za konceptualnu fazu razvoja tehničkih sustava.

**Poglavlje 5.** donosi rezultate studije u kojoj je provedena pojednostavnjena procjena životnog ciklusa koncepata pranja rublja. U poglavlju su opisani koraci provođenja studije te objašnjeni su metodologija i prikupljanje podataka o konceptima. Cilj je primjene metode procjene utjecaja na okoliš koncepata pranja rublja omogućiti uvid u kvantitativno vrednovanje ekološke prihvatljivosti razmatranih koncepata.

U **poglavlju 6.** opisano je ispitivanje teorijske i empirijske primjenjivosti kriterija i predložene metode vrednovanja ekološke prihvatljivosti za konceptualnu fazu i verifikacija istraživanja u cjelini. U sklopu istraživanja provedeno je kvalitativno i kvantitativno vrednovanje ekološke prihvatljivosti koncepata pranja rublja te su spomenuta vrednovanja i analize koncepata postigli rezultate koji su usporedivi s rezultatima vrednovanja ekološke prihvatljivosti s pomoću predložene metode. U poglavlju su objašnjene pretpostavke koje su bile nužne za provedbu procjene životnog ciklusa testnih konceptijskih rješenja. Validacija kriterija i predložene metode te verifikacija istraživanja temelje se na analizi teorijskih postavki, kao i na analizi učinkovitosti, primjenjivosti, korisnosti i ograničenja kriterija i predložene metode. Poglavlje završava zaključcima o konačnom ishodu istraživanja i potvrđenoj hipotezi.

**Poglavlje 7.** obuhvaća zaključak doktorskog rada. U zaključku se navode rezultati istraživanja, obrazlažu se znanstveni doprinosi istraživanja, te daju preporuke za primjenu kriterija ekološke prihvatljivosti i predložene metode. su Provedenim istraživanjem otvorena neka nova pitanja, izložene nove ideje, teme i izazovi koji bi mogli temelj za pokretanje novih istraživanja u smjeru razvoja metoda i alata za potporu osmišljavanju ekološki prihvatljivih konceptijskih rješenja proizvoda. Stoga su završne riječi ove disertacije posvećene opisu smjernica za buduća istraživanja.



## 2. PREGLED PODRUČJA ISTRAŽIVANJA

*U ovom je poglavlju definiran teorijski okvir istraživanja. Objašnjeni su motivacija i razlozi za pokretanje istraživanja na temu vrednovanja ekološke prihvatljivosti tehničkih sustava u konceptualnoj fazi razvoja. Istraživanja ekodizajna pri konstruiranju bave se proučavanjem procesa i metoda za razvoj ekološki prihvatljivih proizvoda i usluga. Nadalje, bave se adekvatnim i pravovaljanim vrednovanjem ekološke prihvatljivosti proizvoda kako bi se izbjegli neprimjereni utjecaji proizvoda na okoliš prije proizvodnje. Poglavlje završava pregledom i analizom metoda i alata ekodizajna koji služe vrednovanju ekološke prihvatljivosti proizvoda, a primjenjuju se u konceptualnoj fazi razvoja tehničkih sustava.*

---

### 2.1. Teorijski okvir istraživanja

Teorijski okvir istraživanja čine ideje, koncepti i teorije iz znanosti o konstruiranju te ekodizajnerskom pristupu konstruiranju tehničkih sustava koji se u literaturi naziva *konstruiranjem za okoliš – ekodizajnom* (engl. *Design for Environment – ecodesign*).

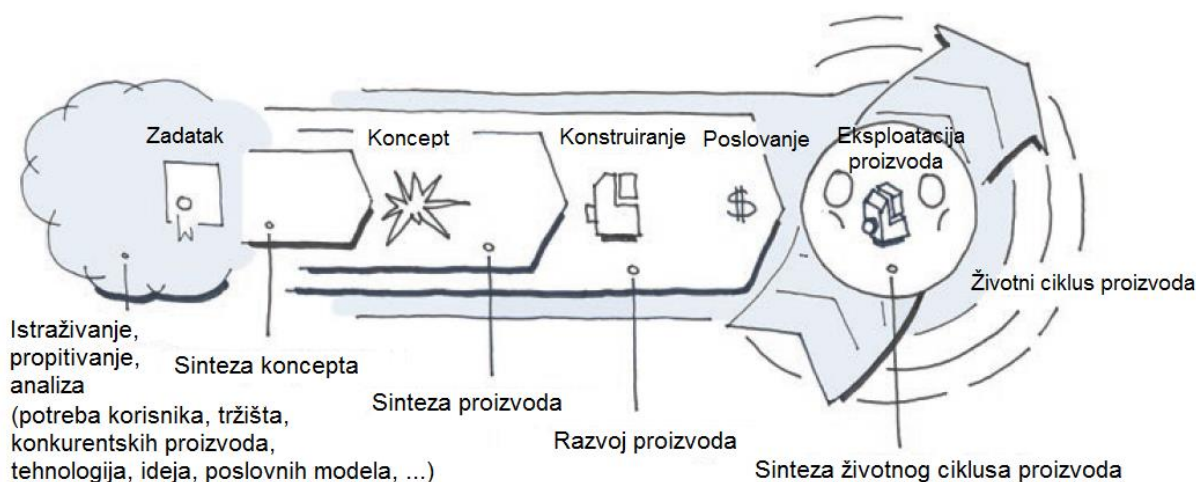
#### 2.1.1. Konstruiranje i razvoj proizvoda

Proces konstruiranja proizvoda započinje zbog potreba tržišta ili nove ideje proizvoda. Svrha je konstruiranja razvoj rješenja koje zadovoljava zahtjeve kupaca i funkcionalne zahtjeve. Rješenje ima biti razrađeno od funkcijske dekompozicije do detalja, čime se omogućuju proizvodnja i komercijalizacija proizvoda [91]. Zbog toga što je proces konstruiranja i razvoja proizvoda zahtjevan glede organizacije i upravljanja aktivnostima

realizacije proizvoda, ne bi ga bilo moguće provesti bez strukturiranog i unaprijed osmišljenoga plana razvoja [92].

Modeli procesa konstruiranja jesu prikazi strukturiranja zadataka konstruiranja i procesa razvoja proizvoda [11], [72], [93]. Andreasenov i Heinov model integriranog razvoja proizvoda [44] prikazuje da je riječ o usporednim aktivnostima u kojima sudjeluju akteri iz različitih disciplinarno podijeljenih odjela poduzeća (marketing i prodaja, konstrukcija i proizvodnja, nabava i distribucija).

Andreasen i drugi [94] prikazali su isprepletenost različitih aktivnosti konstruiranja ,od nastanka i razvoja ideje proizvoda do realizacije i lansiranja na tržište modelom integriranog razvoja proizvoda (slika 2.1.). Model definira osnovne aktivnosti pri konstruiranju i razvoju proizvoda: definiranje zadatka konstruiranja, razvoj koncepta, konstrukcijsku razrada, razvoj modela poslovanja, proizvod u eksploataciji i definiranje parametara životnog ciklusa proizvoda.



*Slika 2.1. Model razvoja proizvoda (Andreasen i drugi [94])*

Koordinacija procesa razvoja i provjera napredovanja procesa razvoja proizvoda temelje se na procedurama koje je definiralo poduzeće. Procedure mogu propisivati specifične zadatke, korake ili metode (kao što su provjera napreznja konstrukcije ili *FMEA* analiza [95]) i upute kako i kada ih valja provoditi.

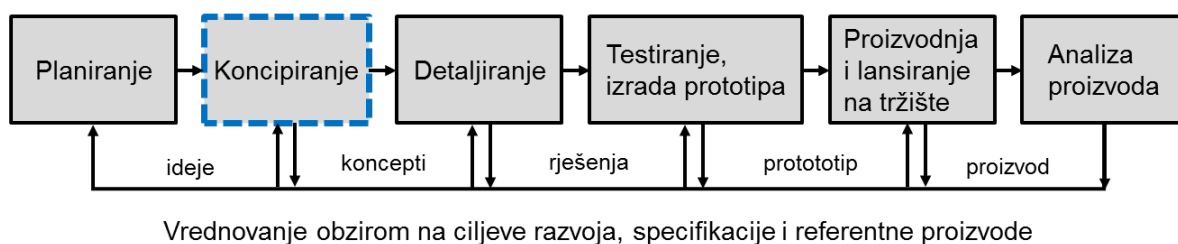
Prema Ullmanu [11], rane faze procesa konstruiranja (razvoj koncepta i oblikovanje proizvoda) karakterizira nedostatak znanja o proizvodu, tj. o njegovu konačnom rješenju. Tijekom konstrukcijske razrade definira se sve više značajki rješenja proizvoda te je sve manje nepoznanica glede konačnih karakteristika proizvoda i njegova životnog ciklusa.

Odluke o ključnim značajkama proizvoda i strukturi proizvoda određuju konačan izgled, kvalitetu i troškove proizvoda koji se razvija [92].

Tijekom konstruiranja povećava se broj definiranih značajki proizvoda, a smanjuje se tzv. stupanj slobode rješenja [3], [44]. Značajke proizvoda moguće je kategorizirati prema tzv. razinama razrade značajki proizvoda [44], [96]. Počevši s apstraktnijim razinama razrade (kao što su definiranje svrhe proizvoda i njegovih funkcija), proces konstruiranja usmjerava se prema konkretizaciji proizvoda i definiranju značajki proizvoda koji su komponente, materijali, kvaliteta površina i tolerancije [44].

U konceptualnoj fazi generira se nekoliko konceptijskih rješenja na temelju usuglašenih funkcionalnih zahtjeva i zahtjeva korisnika. Značajke koncepta referentne su vrijednosti na temelju kojih se provodi vrednovanje i ocjenjivanje prema prethodno dogovorenim kriterijima vrednovanja. Izborom koncepta proizvoda predodređene su značajke ključne za nastavak razvoja (npr. radni principi, struktura proizvoda i tehnološki postupci proizvodnje) i obilježja proizvoda (npr. kvaliteta proizvoda, obilježja tijekom eksploatacije). Odluka o konceptu i specifikacijama proizvoda označuje završetak konceptualne faze, a nastavak procesa konstruiranja temeljen je upravo na toj odluci. O specifikacijama proizvoda zaključuje se na temelju odluka donesenih tijekom procesa konstruiranja i razvoja proizvoda [97].

Prema standardu ISO/TR 14062 [98] vrednovanje utjecaja na okoliš proizvoda u procesu konstruiranja proizvoda temelji se na dostupnim informacijama o proizvodu (slika 2.2.). Standardom ISO/TR 14062 propisane su smjernice vrednovanja ekološke prihvatljivosti tijekom razvoja i ciljevi vezani za što manji utjecaj na okoliš.



**Slika 2.2.** Proces razvoja prema ISO/TR 14062 [98], [99]

U literaturi se utjecaji na okoliš prikazuju u jedinicama utjecaja na okoliš, a rezultati procjene utjecaja na okoliš kvantitativno prikazuju po tome koliko je jedinica utjecaja na okoliš procijenjeno za pojedine kategorije utjecaja na okoliš. Primjer kategorija utjecaja na okoliš jesu: klimatske promjene, smanjivanje ozonskog omotača, kiselost okoliša,

fotooksidacija, deforestacija, utjecaj toksičnih kemijskih spojeva na ekosustave i zdravlje ljudi, smanjivanje iskoristivih (zelenih) površina i potrošnja neobnovljivih resursa. ISO/TR 14062 standard ne propisuje zahtjeve ili tehničke specifikacije za konstruiranje i razvoj ekološki prihvatljivih proizvoda te nema službenih uputa za primjenu toga standarda u praksi [100].

Za vrednovanje prema ISO/TR 14062 [98], potrebne su detaljne informacije o proizvodu i njegovu životnom ciklusu te procjena utjecaja na okoliš proizvoda (*LCA*) [1]. U ranim fazama razvoja, kada nije razrađena detaljna specifikacija proizvoda, a time nema potrebnih podataka o proizvodu i njegovu životnom ciklusu, vrednovanje ekološke prihvatljivosti temeljeno na procjeni životnog ciklusa nije moguće provesti [101]. Kada je riječ o razvoju originalnih koncepata [60], nije moguće generirati dovoljno detaljan opis koncepta i specifikacije proizvoda, i to zbog toga što uobičajeno nema referentnih proizvoda za usporedbu [102].

### 2.1.2. Konceptualna faza i vrednovanje koncepata

Najvažniji ishod konceptualne faze jest odabir koncepta koji će ući u daljnju konstrukcijsku razradu i u konačnici rezultirati gotovim proizvodom. U konceptualnoj se fazi teži generiranju i razmatranju većega broja koncepata proizvoda. Koncepti proizvoda koji su superiorni ostalim kandidatima izabrani su za unapređivanje, nastavak razvoja i konstrukcijsku razradu [103].

Izbor koncepata podrazumijeva vrednovanje koncepata i odlučivanje o konceptima za unapređivanje, nastavak razvoja i konstrukcijsku razradu. Vrednovanje koncepata provodi se usporedbom koncepata, ocjenjivanjem koncepata na temelju kriterija vrednovanja ili na način da se kvantitativnim vrijednostima opisuju nesigurnosti pri odlučivanju [104]. Kriteriji mogu biti funkcionalni zahtjevi (određuju funkcionalnost proizvoda), zahtjevi koje postavljaju proizvođači, dionici i korisnici, troškovi (razvoja, proizvoda i životnog ciklusa), tehnička izvedivost, pouzdanost tijekom rada i eksploatacije, vrijeme potrebno za razvoj, tehnička kompleksnost, kvaliteta zadovoljenja potreba korisnika, utjecaji na okoliš i drugi. Svrha izbora između više mogućih rješenja jest izbor najboljeg koncepta koji će biti razrađen do detalja u nastavku procesa konstruiranja.

Odluka o konceptu i općenito odluke koje se donose u konceptualnoj fazi imaju znatan utjecaj na troškove, robusnost, pouzdanost i kvalitetu proizvoda, izbor tehnoloških postupaka proizvodnje i trajanje procesa razvoja. Troškovi koji nastaju zbog izmjene konceptijskoga

rješenja nakon jednom izabranog koncepta rastu što je izmjena kasnije implementirana u proces konstruiranja [105].

U literaturi se navodi da su informacije o proizvodu u konceptualnoj fazi nepotpune i neprecizno opisuju proizvod [106], [107], odnosno postoji neizvjesnost glede konačnih značajki proizvoda i ukupnih troškova [104]. Pri izboru koncepta konstruktori se vode pretpostavkama o karakteristikama proizvoda pri radu i u fazi eksploatacije.

Metode koje se primjenjuju pri odlučivanju o najpovoljnijem konceptu mogu biti *VDI 2225* smjernice za vrednovanje [72], *Go/No go* provjere koncepta [72], uspoređivanje s najboljima (engl. *benchmarking*), *QFD* metode [47] ili metode umjetne inteligencije, npr. metode neizrazite logike (engl. *fuzzy logic*), neuronske mreže, genetički algoritmi i druge.

Pri odlučivanju u ranim fazama konstruiranja i razvoja proizvoda kriterije vrednovanja teško je kvantificirati, pa se upotrebljavaju posebne lingvističke varijable kao što su „dobro“, „srednje“, „loše“. Ovakav način ocjenjivanja smatra se primjerenijim ocjenjivanju koncepta na temelju kriterija vrednovanja, jer pruža određenu fleksibilnost pri dodjeljivanju ocjena konceptima, nego u slučajevima kada su ocjene koncepta definirane preko kvantitativne vrijednosti, odnosno izražene brojem [104].

Metode umjetne inteligencije koje se primjenjuju pri odlučivanju, kao što su neizrazita logika i neuronske mreže, ne mogu se rabiti za rješavanje problema višekriterijskog odlučivanja [104]. Kako bi se riješio problem odlučivanja s velikim brojem kriterija i hijerarhijom važnosti kriterija, primjenjuju se metode kao što je metoda analitičkoga hijerarhijskog procesa (engl. *Analytic Hierarchy Process – AHP*) [108].

Koncepti proizvoda koji se generiraju u konceptualnoj fazi razvojnoga procesa uobičajeno se prikazuju skicama koje prikazuju način rada proizvoda, funkcije i radne principe proizvoda te organe koji čine strukturu proizvoda [109]. Detaljnost skica koncepta proizvoda razlikuje se od autora do autora. Skice koncepta ilustriraju 'ideje' [110], 'skice' [64], 'scheme' [110], odnosno 'principijelna rješenja' proizvoda [72].

U konceptualnoj se fazi generiraju i razmatraju funkcije proizvoda, i to na temelju funkcionalnih zahtjeva, zahtjeva korisnika i ostalih zahtjeva. Obično se generira više alternativnih radnih principa za ostvarivanje funkcija, parcijalnih funkcija i principijelnih rješenja. Principijelna rješenja proizlaze iz kombiniranja funkcija i tehničkih rješenja funkcija [111]. Konceptijska su rješenja specifikacija principa rada proizvoda, odnosno radnih principa proizvoda [72]. Tablica 2.1. prikazuje objašnjenje pojmova koncept proizvoda, radni

principi proizvoda te gradivna obilježja koncepata prema Hubki i Ederu [65], Pahlu i drugima [72], Willhelmsu [111], Malmqvistu [112], Motteu [113] i Anderssonu [114].

**Tablica 2.1.** Analiza pojmova koncept proizvoda i radni principi proizvoda

Koncept proizvoda	Radni principi	Gradivna obilježja koncepta	Stupanj razrade koncepta
Funkcije i tehnička rješenja [111]	Tehnička rješenja funkcija proizvoda	Značajke koncepta su značajke ranih principijelnih rješenja	nizak
Struktura proizvoda (organi) [112]	- nema podataka	Značajke koncepta nisu radni principi, niti značajke organa	nizak
Radni principi i organi proizvoda [113]	Tehnička rješenja organa proizvoda	- nema podataka	nizak
Organi proizvoda, ključni sklopovi, model funkcija i specifikacije [65]	Veza između komponenata i funkcija proizvoda	Značajke koncepta su geometrijska obilježja organa, ključnih sklopova i komponenata	srednji
Radni principi, struktura proizvoda (ključni sklopovi), preliminarni oblici i dimenzije [114]	Fizikalni efekti	Značajke koncepta su fizikalni efekti	srednji
Radni principi i principijelna rješenja [72]	Funkcijska struktura, fizikalni efekti i značajke principijelnih rješenja	Značajke koncepta su fizikalni efekti, geometrijske značajke i svojstva materijala principijelnih rješenja	visok

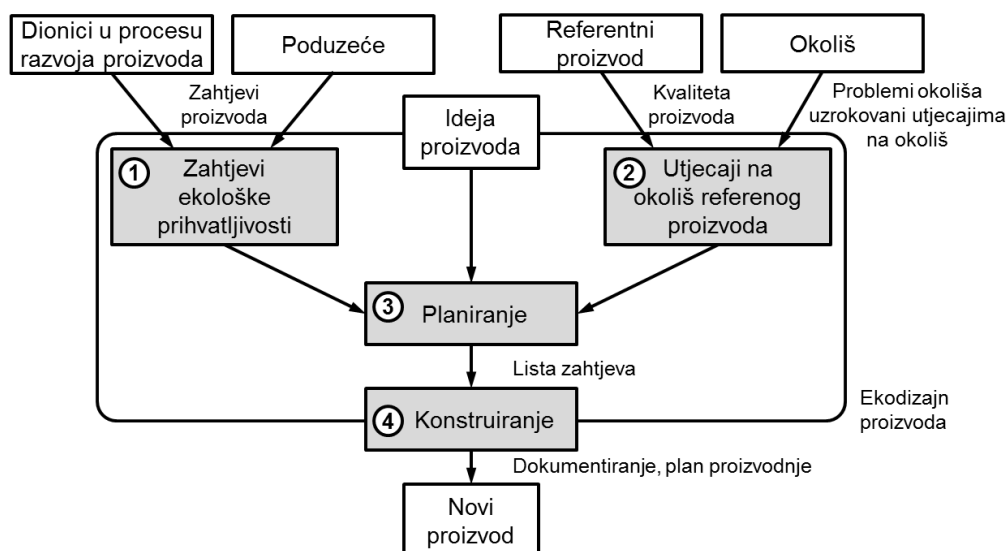
Tehničke sustave potrebno je vrednovati kvalitativno, kvantitativno i s obzirom na troškove [72]. Kvantifikacija efekata odvija se u fazama razvoja nakon konceptualne faze [114], pa je sukladno tomu, vrednovanje na temelju značajki proizvoda izraženim kvantitativnim fizikalnim veličinama temelj donošenja odluka nakon konceptualne faze.

### 2.1.3. Ekodizajn

U procesu razvoja proizvoda često je potrebno razmotriti i ispuniti različite zahtjeve glede ekološke prihvatljivosti, ali i uskladiti ih s ciljevima razvoja. Ekodizajn je pristup kojim se razmatraju ekološki (okolišni) čimbenici u procesu razvoja proizvoda, a sa svrhom razvoja ekološki prihvatljivih proizvoda i usluga [115], [116], [117], [118].

Primjenom principa ekodizajna tijekom razvoja novih ili unapređenja postojećih proizvoda, poduzeća nastoje iskoristiti mogućnost da se prije proizvodnje i stavljanja proizvoda na tržište predvide učinci na okoliš, na sigurnost i zdravlje korisnika [119]. Svrha je ekodizajna preventivno smanjiti ili potpuno izbjeći potencijalno štetne učinke proizvoda na okoliš, a to se čini u fazama procesa konstruiranja u kojima postoji najveći potencijal za

razvoj ekološki prihvatljivih proizvoda i usluga [120]. Najpopularnije i u industriji najviše primjenjivane metode ekodizajna su procjena utjecaja na okoliš (*LCA*), analiza životnog ciklusa te metode za ekološki prihvatljivo oblikovanje i proizvodnju [3], [121]. Slika 2.3. prikazuje model procesa razvoja ekološki prihvatljivih proizvoda.



**Slika 2.3.** Proces razvoja ekološki prihvatljivih proizvoda – ekodizajn [122]

Prevladavajući pristup vrednovanju ekološke prihvatljivosti proizvoda temelji se na kvantitativnoj procjeni utjecaja proizvoda na okoliš [8]. Utjecaji proizvoda na okoliš procjenjuju se za potrebe donošenja odluka u procesu konstruiranja. Utjecaji na okoliš razmatraju se usporedno s drugim tradicionalno važnim kriterijima vrednovanja kao što su kvaliteta zadovoljenja korisničkih zahtjeva, funkcionalnost, profitabilnost, sigurnost, pouzdanost tijekom rada, ergonomija, tehnička izvedivost i estetski zahtjevi [123].

Procjena utjecaja proizvoda na okoliš obuhvaća analizu životnog ciklusa proizvoda i primjenu metoda za računanje utjecaja proizvoda na okoliš. Svrha provođenja analize životnog ciklusa proizvoda jest maksimiranje ekoefikasnosti te identificiranje procesa u životnom ciklusu proizvoda kod kojih postoji potencijal za redukciju potrošnje materijala i energije. Analizom životnog ciklusa proizvoda rano u procesu konstruiranja nastoji se omogućiti implementacija ekološki prihvatljivijih rješenja i alternativa [98].

Metodologije i metode za procjenu utjecaja proizvoda na okoliš tijekom životnog ciklusa proizvoda poznate su pod zajedničkim nazivom procjena životnog ciklusa – *LCA* [1]. Riječ je o tehnici procjene utjecaja na okoliš za razmatranje proizvoda, usluga ili procesa s obzirom na definiranu glavnu funkciju proizvoda, uslugu ili proces [98].

Ekodizajnerskim pristupom propisano je istodobno razmatranje ekoloških i ekonomskih čimbenika tijekom procesa razvoja, odnosno maksimiranje ekoefikasnosti proizvoda [3], [117], [124]. Ekoefikasnost proizvoda u literaturi se definira kao omjer vrijednosti proizvoda izražene u monetarnim ili nominalnim jedinicama i utjecaja proizvoda na okoliš izražena u jedinicama utjecaja na okoliš [125], [126], [127], [128]. Takozvana vrijednost proizvoda jest referentna vrijednost koju određuje poduzeće, a definira se na temelju vrednovanja funkcionalnosti proizvoda, kvalitete zadovoljenja korisničkih potreba ili procijenjene tržišne vrijednosti proizvoda [127].

Nadalje, ekodizajn je oblikovanje proizvoda i usluga sa svrhom ostvarivanja rješenja koja zadovoljavaju potrebe društva za održivim razvojem [117], [129], [130]. Ideja je održivog razvoja da očuvanje okoliša ne isključuje ekonomski prosperitet poduzeća i nije u suprotnosti s poslovnim ciljevima razvoja. Za razliku od ekoefikasnosti, razmatranje održivosti proizvoda zahtijeva postavljanje fundamentalnih pitanja o održivosti potrošnje i proizvodnje i razmatranje društvenih čimbenika [124], [131], [132].



**Slika 2.4.** Ekodizajn, razvoj održivih proizvoda i održivi razvoj [24]

Practiciranje održivog razvoja ovisi o upravljanju kompleksnim spletom procesa povezanih s proizvodom (slika 2.4.), a za procjenu održivosti proizvoda i procesa potreban je veliki broj podataka o proizvodu, proizvodnji i potrošnji [133]. Također, zbog toga što su društveni i okolišni učinci nefinancijski pokazatelji održivosti (temeljeni na kvalitativnoj



interpretaciji koju provode donositelji odluka), njihova implementacija u procese odlučivanja je složena [134].

Za poduzeća strategije održivog razvoja impliciraju razvoj ekološki prihvatljivih proizvoda i usluga [135]. Istraživači potvrđuju povezanost razvoja ekološki prihvatljivih proizvoda sa ostvarivanjem ušteda i povećanjem profitabilnosti poduzeća [118]. Strane zainteresirane za pitanja ekološke prihvatljivosti proizvoda za poduzeća nisu samo proizvođači, korisnici (odnosno potrošači), nego i društvo (tablica 2.2.).

**Tablica 2.2.** Prednosti ekodizajna [136], [137]

Aspekti	Poduzeće	Korisnici	Društvo
materijalni	niži troškovi, veći profit	niži troškovi posjedovanja proizvoda niža cijena proizvoda	niža potrošnja resursa
nematerijalni	jednostavnija proizvodnja i prodaja	bolji (kvalitetniji) proizvod	kompatibilnost sa zakonskim regulativama
emocionalni	motiviraniji zaposlenici	osjećaj većeg životnog standarda i kvalitetniji život	pozitivni koraci prema održivom društvu

Ciljevi razvoja poput smanjivanja troškova razvoja i povećanja profita te ambicioznost poduzeća da ih ostvari, utječu na uspješnost primjene ekodizajna i smanjivanje utjecaja proizvoda i procesa na okoliš. Osim ciljeva razvoja koji se postavljaju interno u poduzeću, postoje i ciljevi iz kojih proizlaze zahtjevi u vezi s proizvodom, a koji mogu biti temeljeni na normama i zakonskim te pravnim regulativama koje se tiču proizvoda i razvojnog procesa (tablica 2.3.). Normama te zakonskim i pravnim regulativama mogu biti propisani ispravni načini zbrinjavanja proizvoda i klasifikacija proizvoda prema energetske razredima [115].

**Tablica 2.3.** Vanjski faktori i utjecaji na motivaciju te unutarnje motivacije poduzeća za implementaciju ekodizajna u okruženje poduzeća [118]

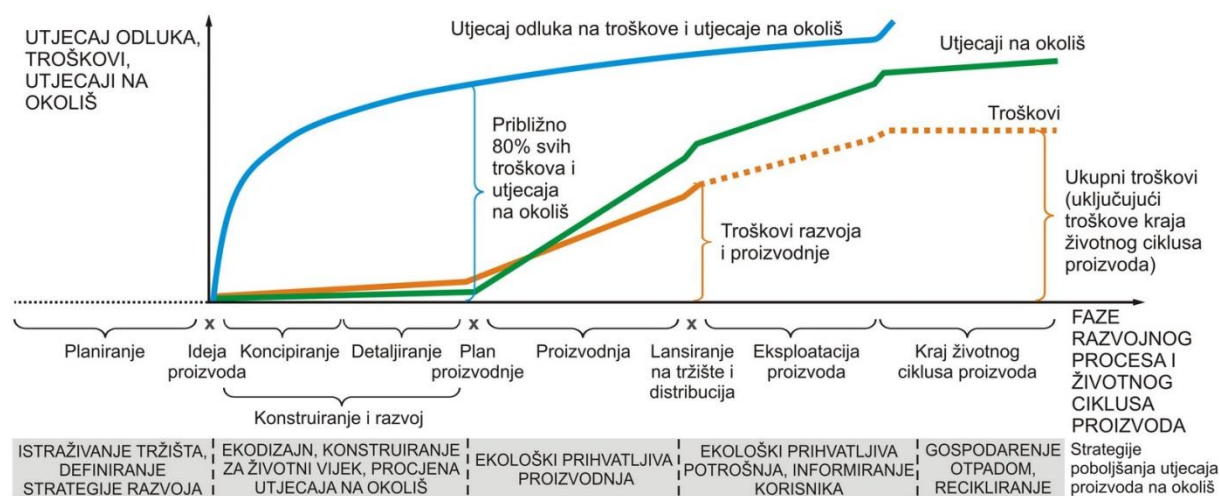
Vanjski faktori i utjecaji na motivaciju poduzeća za implementaciju ekodizajna	Unutarnje motivacije poduzeća za implementaciju ekodizajna
zakonske i pravne regulative ostvarivanje veće konkurentnosti na tržištu utjecaj konkurencije, trendova i kretanja na tržištu (engl. <i>market push</i> ) utjecaj razvoja tehnologije u tržišnoj niši ili tehnologije općenito (engl. <i>technology push</i> )	kvalitetniji i bolji proizvodi zahtjevi korisnika za ekološki prihvatljivijim proizvodima smanjenje troškova razvoja smanjenje ukupnih troškova (uključujući troškove životnog ciklusa proizvoda) povrat uloženi sredstava u obliku profita

Iako je primarni cilj ekodizajna smanjiti utjecaje proizvoda na okoliš, postoje i druge prednosti njegove implementacije kao što su povećanje konkurentnosti na tržištu

smanjivanjem troškova, osvajanje novih tržišta, razvoj novih proizvoda i optimizacija portfelja proizvoda [134], [138]. Troškovi se smanjuju zbog redukcije potrošnje energije i materijala životnog ciklusa proizvoda. Za poduzeća su smanjivanje troškova i povrat ulaganja najvažnije motivacije za primjenu ekodizajna preko analize životnog ciklusa proizvoda [118].

Prema smjernicama održivog razvoja, poslovni modeli, proizvodi i usluge trebaju zadovoljavati potrebe korisnika na društveno najprihvatljiviji način, sa najnižim troškovima i utjecajima na okoliš [139]. Ekonomski, okolišni i društveni učinci poslovanja poduzeća, održivi razvoj, briga za okoliš i stupanj društveno odgovornog poslovanja sastavni su dijelovi vizije i inovacijskih strategija poduzeća ([134], [135]) uz tradicionalno važne čimbenike uspješnosti na tržištu kao što su konkurentnost poduzeća i prepoznavanje prilika na tržištu.

Istraživači koji proučavaju ekodizajn savjetuju uvođenje metodologija, metoda i alata što prije u proces razvoja proizvoda [140]. Odluke donesene u ranim fazama najviše utječu na konačnu strukturu proizvoda, njegove karakteristike i životni vijek te, posljedično tomu, i njegov utjecaj na okoliš. Preporučuje se što ranije smanjiti utjecaj proizvoda na okoliš i, ako je moguće, omogućiti izmjene i poboljšanja u tzv. fleksibilnijim fazama razvoja. U suprotnome, u kasnijim (ili završnim) fazama nije moguće implementirati izmjene i poboljšanja koja donose i najveće uštede glede utjecaja na okoliš jer su najvažnije odluke koje se tiču tehničkog rješenja proizvoda već donesene [98]. Ramani i drugi [102] ističu da je ekodizajn potrebno implementirati u svim fazama procesa konstruiranja, no nedostaci strategija ekodizajna [141] su što su primjenjive samo u nekim fazama razvoja te je njima moguće unaprijediti samo određene faze životnog ciklusa proizvoda (slika 2.5.).



**Slika 2.5.** Utjecaj odluka tijekom konstruiranja i razvoja proizvoda na konačni utjecaj proizvoda na okoliš i troškove [29]

#### 2.1.4. Životni ciklus proizvoda

Životni ciklus proizvoda jest proces transformacije energije i materijala tijekom životnog vijeka proizvoda, od vađenja sirovina do ekološki prihvatljivog odlaganja proizvoda [28]. Životni ciklus proizvoda počinje vađenjem sirovina i proizvodnjom sirovih materijala koji se dalje upotrebljavaju u proizvodnji komponenata proizvoda. Nakon nabave sirovina i proizvodnje komponenata, proizvod se sastavlja, pakira i distribuira na tržište. Nakon što je proizvod završio svoj koristan životni vijek (faza eksploatacije), njegov životni ciklus završava za okoliš sigurnim zbrinjavanjem. Završnu fazu životnog ciklusa proizvoda čini rastavljanje, recikliranje materijala, ekološki prihvatljivo odlaganje ili ponovno iskorištavanje komponenata proizvoda u sljedećoj generaciji proizvoda [72].

Faze životnog ciklusa proizvoda generički opisuju različita fizička, funkcionalna ili za utjecaje na okoliš važna obilježja i karakteristike proizvoda. Termin „životni ciklus“ odnosi se na namjeru da se temeljito i holistički procijene uporaba sirovina u proizvodnji, proizvodnja, distribucija, eksploatacija i odlaganje, uključujući i prijevoz između navedenih faza životnog ciklusa. Zbroj svih nabrojanih koraka i faza čini životni ciklus proizvoda. Svaka faza životnog ciklusa proizvoda zbog zajedničkih obilježja razmatra se zasebno pri procjeni životnog ciklusa proizvoda (*LCA*).

Faze životnog ciklusa proizvoda:

- ekstrakcija i priprema sirovina za proizvodnju materijala
- proizvodnja materijala od sirovina
- proizvodnja, sastavljanje i pakiranje
- prijevoz sirovina, nabava materijala, standardnih komponenata proizvoda i distribucija proizvoda
- eksploatacija proizvoda, održavanje i usluge povezane s proizvodom u fazi korisnog životnog vijeka proizvoda
- kraj životnog vijeka proizvoda (zbrinjavanje otpada i proizvoda, rastavljanje, odlaganje na odlagališta, recikliranje, uporaba energije itd.).

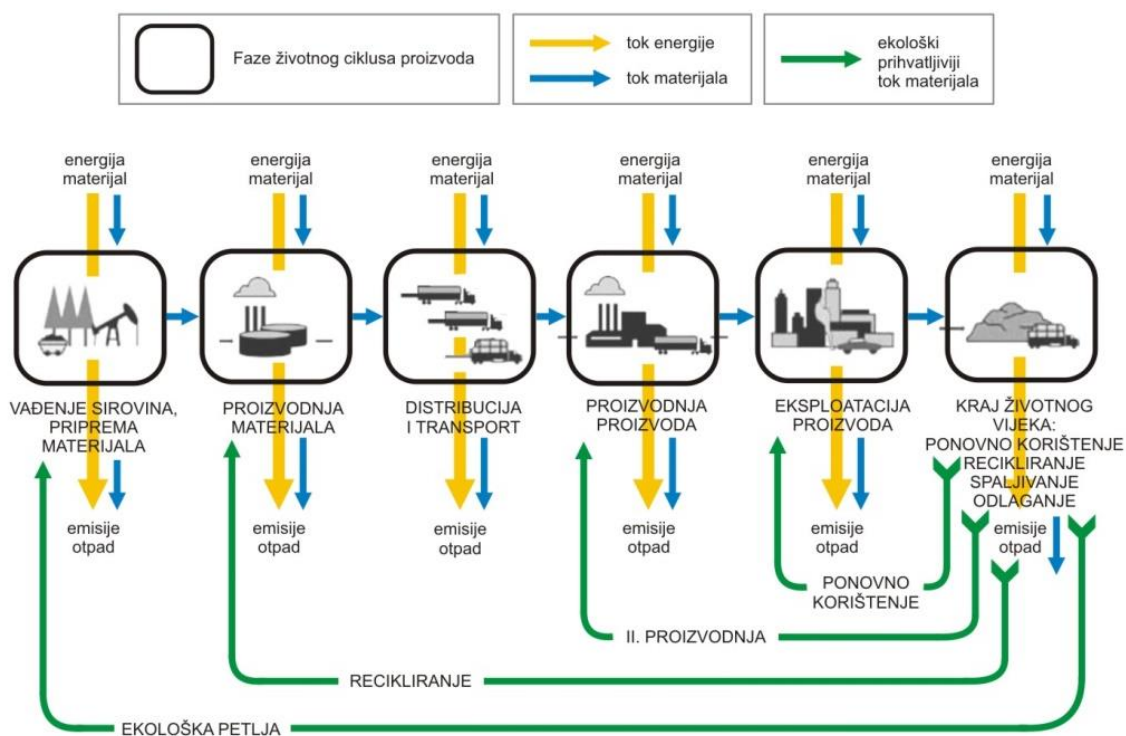
Metodologije kojima se opisuje način strukturiranja životnog ciklusa proizvoda razvijene su za potrebe prikaza životnog ciklusa različitih proizvoda i sustava proizvod – usluge. Prijašnje su metodologije propisivale prikaz generičkih faza životnog ciklusa te

ulaznih i izlaznih tjevkova energije i materijala između pojedinih faza životnog ciklusa proizvoda, koji se mogu nazvati i transformacijama u životnom ciklusu proizvoda [26], [142], [143]. Proizvodi su u interakciji s okolišem na način da postoji razmjena energije i materijala u svakoj fazi njihova životnog ciklusa [102]. U svim fazama životnog ciklusa proizvoda, usluga ili sustava proizvoda i usluga, postoji potrošnja resursa (izravno materijala ili posredno energije), a oni nakon transformacije postaju utjecaji na okoliš u obliku emisija ili otpada.

Svrha provođenja analize životnog ciklusa proizvoda jest identificiranje procesa u kojima postoji mogućnost povećanja ekoefikasnosti i smanjivanja potrošnje materijala i energije, kako bi se prije same proizvodnje i lansiranja proizvoda na tržište implementirala ekološki prihvatljivija rješenja [98]. Prema principima ekodizajna, ako se rano u procesu konstruiranja identificiraju za okoliš kritični parametri potrošnje energije i materijala, moguće je izbjeći neprimjereno velik utjecaj na okoliš u kritičnim fazama životnog ciklusa proizvoda.

### 2.1.5. Faktor poboljšanja ekoefikasnosti proizvoda

Istraživači razlikuju pojmove ekoefikasnost i ekoefektivnost [115], [116], [118]. Procjenom životnog ciklusa proizvoda (*LCA*) [1] nastoje se identificirati kritična mjesta za poboljšanje ekoefektivnosti životnog ciklusa proizvoda (slika 2.6.).



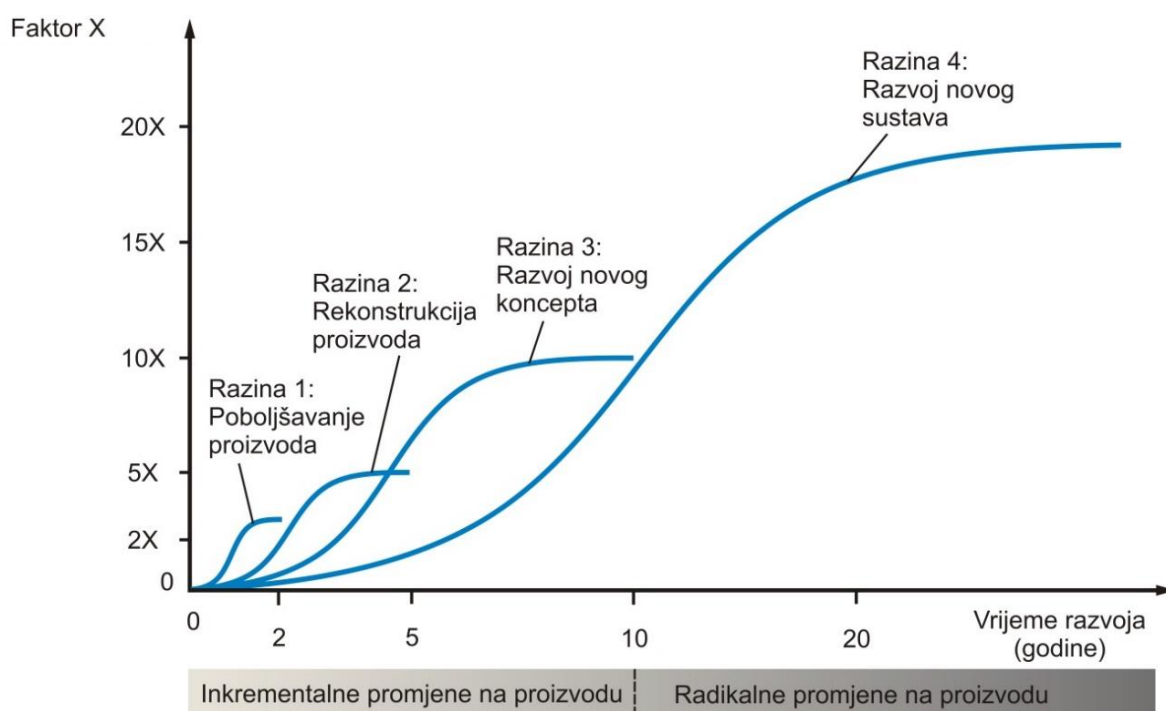
**Slika 2.6.** Faze životnog ciklusa i strategije poboljšanja ekoefektivnosti proizvoda (ilustrirano prema [144])

Procjena ekoefikasnosti proizvoda temelji se na analizama troškova i utjecaja proizvoda na okoliš za koje u pravilu treba uzeti u obzir potrošnju energije i materijala tijekom cijelog životnog ciklusa proizvoda [127]. Ekoefektivnost se odnosi na ekoefektivnost sustava u kojemu je proizvod jedan od komponenti većeg transformacijskog sustava u kojem se nastoji maksimirati ciklično kruženje materijala tijekom životnoga vijeka proizvoda [145]. Poboljšanje ekoefektivnosti životnog ciklusa proizvoda pozitivno utječe i na poboljšanje njegove ekoefikasnosti [146].

U jednadžbi (1) kvaliteta proizvoda ili usluge odnosi se na kvalitetu zadovoljenja zahtjeva kupaca, tržišnu vrijednost ili vrijednost glede funkcionalnosti proizvoda ili usluge [127]. Utjecaj na okoliš jest kvantificirana mjera štetnih utjecaja na okoliš, potrošnje energije i materijala ili količine otpada [127].

$$\text{Ekoefikasnost} = \frac{\text{Kvaliteta proizvoda ili usluge}}{\text{Utjecaj na okoliš}} \quad (1)$$

U ranim fazama razvoja proizvoda moguće je ostvariti veći potencijal za smanjivanje utjecaja proizvoda na okoliš nego što je to moguće u kasnijim fazama [46], [98], [117], [147], [148]. Razvoj novoga koncepta i razvoj novog sustava proizvod – usluge su strategije ekodizajna kojima je moguće postići veći stupanj poboljšanja ekološke prihvatljivosti proizvoda nego rekonstrukcijom proizvoda (slika 2.7.).



**Slika 2.7.** Četiri strategije za postizanje poboljšanja ekoefikasnosti proizvoda [8]

U kontekstu ekodizajna i razvoja proizvoda, pojam 'strategija' odnosi se na skup aktivnosti koje su potpora planiranju i provedbi poboljšanja proizvoda i njegovih ekoloških karakteristika iz perspektive životnog ciklusa proizvoda [149]. Tablica 2.4. prikazuje strategije poboljšanja ekološke prihvatljivosti proizvoda.

$$\text{Faktor } X = \frac{\text{Ekoefikasnost novog proizvoda ili usluge}}{\text{Ekoefikasnost proizvoda ili usluge prije poboljšanja}} \quad (2)$$

U jednadžbi (2) faktor poboljšanja ekoefikasnosti – faktor X jest omjer ekoefikasnosti novog (poboljšanog) proizvoda i ekoefikasnosti proizvoda prije rekonstrukcije [127], [150]. Što je taj omjer veći, veći je i faktor poboljšanja ekološke prihvatljivosti proizvoda [151]. Faktor X moguće je izračunati tek nakon završetka procesa konstruiranja i razvoja (npr. kombiniranjem metode procjene životnog ciklusa – *LCA* i metode procjene troškova životnog ciklusa – *LCC*).

**Tablica 2.4.** *Strategije poboljšanja ekološke prihvatljivosti proizvoda [152]*

Stupanj poboljšanja ekološke prihvatljivosti	Faktor X – faktor poboljšanja ekoefikasnosti	Vrijeme za razvoj ekoinovacije (godine)	Tehnološka inovativnost	Inovativnost u obliku promjena životnoga stila korisnika	Zahtijevana razina uvođenja izmjena infrastrukturne potpore razvojnom procesu
<b>Razina 1:</b> Inkrementalno poboljšanje proizvoda	do 3 puta (5 – 20 %)	0 - 2 god.	niska	minimalna	minimalna
<b>Razina 2:</b> Rekonstrukcija proizvoda	3 do 5 puta (20 - 50 %)	0 - 5 god.	srednja	niska	minimalna
<b>Razina 3:</b> Razvoj novog koncepta proizvoda	5 do 10 puta (50 - 75 %)	0 - 10 god.	visoka	visoka	visoka
<b>Razina 4:</b> Razvoj novog sustava proizvod – usluge	10 do 20 puta (>75 %)	0-30 god.	vrlo visoka	vrlo visoka	vrlo visoka

#### Razina 1: Inkrementalno poboljšanje proizvoda

Ekoinovacije na prvoj razini unapređenja slike utjecaja proizvoda na okoliš odnose se primjerice na izbor ekološki prihvatljivijih materijala komponenata proizvoda. Unapređenje proizvoda usmjereno je na smanjivanje utjecaja na okoliš već postojećega proizvoda [153].

### Razina 2: Rekonstrukcija proizvoda

Pri rekonstrukciji proizvoda koncept proizvoda se ne mijenja. Provodi se rekonstrukcija na razini arhitekture proizvoda ili njegovih komponenata [153]. Time je moguće znatno izmijeniti karakteristike proizvoda koje posredno utječu na okoliš u pojedinim fazama životnog ciklusa proizvoda [154]. Halila i Hörte [155] poboljšanja proizvoda na ovoj razini dijele na rekonstrukcije proizvoda manjeg i većeg opsega.

### Razina 3: Razvoj novog koncepta proizvoda

Pri razvoju novog koncepta proizvoda ekoinovacije nisu ograničene samo na promjenu koncepta proizvoda, nego su usmjerene na razmatranje načina ostvarivanja funkcija [153] i razmatranje funkcija proizvoda [156]. Ova, treća razina poboljšanja ekоеfikasnosti proizvoda provodi se radi razmatranja ne samo proizvoda nego proizvoda kao dijela sustava kojim se ostvaruje svrha proizvoda unutar sustava ostvarenja usluga i zadovoljenja potreba korisnika. U ovu kategoriju ekoinovacija uključen je i razvoj poslovnih modela proizvoda i usluga, pri čemu su pojedine funkcije proizvoda zamijenjene uslugama [156]. Razvoj novog koncepta proizvoda zahtijeva fundamentalno razmatranje funkcija proizvoda i s njima povezanih utjecaja na okoliš [154]. Razvoj novih koncepata proizvoda označuje radikalniju inovaciju proizvoda, a time i potencijalno veća poboljšanja njegove ekоеfikasnosti nego što je to moguće postići inkrementalnim promjenama (rekonstrukcijom) postojećega proizvoda [8].

### Razina 4: Razvoj novog sustava proizvod – usluge

Najzahtjevniji oblik ekoinovacija jest razvoj novih poslovnih sustava proizvoda i usluga [27], [153] jer zahtijeva promišljanje dotadašnjeg načina proizvodnje i eksploatacije proizvoda te promjenu sociotehničkog sustava proizvoda [157], [158]. Ovom ekoinovacijskom strategijom moguće je postići poboljšanje ekоеfikasnosti veću od 75 % (tablica 2.4.).

#### 2.1.6. Konstruiranje za okoliš

Metode konstruiranja za okoliš primjenjuju se radi poboljšanja ekološke prihvatljivosti proizvoda u fazi oblikovanja i u fazi razrade proizvoda [102]. Ekološka prihvatljivost proizvoda proizlazi iz razmatranja obilježja proizvoda koja upućuju na poželjne i manje poželjne karakteristike proizvoda i njegova životnog ciklusa [159]. Metode konstruiranja za okoliš jesu konstruiranje za rastavljivost, pakiranje, modularnost proizvoda, kraj životnog ciklusa proizvoda, konstruiranje za ponovnu proizvodnju (engl. *remanufacturing*) i druge.

Izbor odgovarajuće metode konstruiranja za okoliš uvjetovan je karakteristikama proizvoda i životnim ciklusom proizvoda koji su specifični za određeno poduzeće, tržišni segment, zahtjeve korisnika i ciljeve razvoja. Kako se spomenute metode temelje uglavnom na rezultatima analize utjecaja na okoliš i troškova razmatranoga proizvoda [160], informacije o proizvodu koje su potrebne za unapređenje ekološke prihvatljivosti proizlaze iz analize proizvoda prethodno distribuiranog na tržište, tj. proizvoda s dobro poznatim utjecajima na okoliš i životnim ciklusom. Zbog specifičnosti proizvoda i njegova životnog ciklusa nije moguće definirati generičku definiciju ekološke prihvatljivosti temeljenu na razmatranju značajki proizvoda koje se unapređuju metodama konstruiranja za okoliš.

### **2.2. Metode i alati za vrednovanje ekološke prihvatljivosti koncepata**

Metode i alati ekodizajna primjenjuju se radi povećanja ekоеfikasnosti proizvoda [138], i to u fazama konstruiranja od konceptualne faze do konstrukcijske razrade i rekonstrukcije. Ekodizajn propisuje kriterije ekološke prihvatljivosti, smjernice za ekološko oblikovanje te alate za poboljšanje ukupne slike utjecaja proizvoda na okoliš [161].

Pochat i drugi [162] analizirali su metode i alate ekodizajna koji se primjenjuju u poduzećima koja se bave konstruiranjem i razvojem proizvoda. Zaključili su da je većina od oko 150 metoda i alata koje su analizirali namijenjena analizi postojećih, već komercijalnih proizvoda i rekonstrukciji proizvoda. Vrlo je mali broj metoda i alata ekodizajna koji su namijenjeni razvoju novih proizvoda [162]. Knight i Jenkins [138] objašnjavaju da metode i alati ekodizajna koji se primjenjuju u poduzećima nisu prilagođeni razvoju koji podrazumijeva radikalnije promjena na proizvodu (kao što su razvoj novih konceptijskih rješenja), u njegovom životnom ciklusu ili poslovnom modelu [131], [132].

Vezzoli i Sciamia [120] metode i alate ekodizajna dijele u četiri velike skupine: metode i alati za procjenu životnog ciklusa proizvoda, metode i alati za potporu pri koncipiranju i razvoju proizvoda, metode i alati za izbor strategija za konstruiranje i razvoj te metode i alati za komunikaciju i razmjenu podataka. Bovea i Pérez-Belis [163] razvili su taksonomiju takvih metoda i alata kako bi pružili potporu njihovom izboru te su ih podijelili u skupine prema namjeni (vrsti zadatka ili aktivnosti procesa konstruiranja za koju je metoda ili alat namijenjen) i razini kompleksnosti (vrijeme, informacije i znanje potrebni za prikupljanje podataka o proizvodu i primjenu metode ili alata).



Znanje o ekodizajnu (principima upravljanja životnim ciklusom proizvoda kako bi proizvod bio što ekološki što prihvatljiviji) i iskustvo rada s metodama i alatima ekodizajna osnovni su preduvjet za uspješnu primjenu tih metoda i alata [162]. Ekodizajn je tek u posljednjih 10 godina postao dio obveznih obrazovnih programa inženjera strojarstva [164]. Zbog visoke razine znanja potrebne za primjenu metoda ekodizajna i velikoga broja informacija koje konstruktor mora znati o proizvodu prije primjene, konstruktori najčešće nemaju potrebno predznanje za efektivnu primjenu takvih metoda u praksi.

Metode i alate ekodizajna za vrednovanje ekološke prihvatljivosti uobičajeno se primjenjuju nakon što je utjecaj na okoliš procijenjen analitičkim metodama i alatima (npr. procjenom životnog ciklusa proizvoda), dok se prijedlozi poboljšanja slike utjecaja proizvoda na okoliš temelje na rezultatima vrednovanja ekološke prihvatljivosti [165]. Ekološka je prihvatljivost izražena kvantitativno procjenom utjecaja proizvoda na okoliš, a rezultati služe pronalaženju kritičnih funkcija proizvoda i značajki proizvoda koje je potrebno optimirati.

Metode i alate ekodizajna mogu se podijeliti na skupine metoda i alata prema vrsti ulaznih podataka koji se zahtijevaju za njihovu primjenu [99], [166]. Razlikujemo četiri velike skupine metoda i alata:

- *Kvalitativne*. Informacije o proizvodu koje su ulazni parametri metode ili alata kod kvalitativnih metoda su kvalitativne. Kvalitativnim metodama i alatima propisani su kriteriji ekološke prihvatljivosti koji na kvalitativan način opisuju ideju, koncept ili proizvod, tj. njihove značajke.
- *Semikvantitativne*. Ove metode i alati zahtijevaju kvalitativne ulazne podatke o ideji, konceptu ili proizvodu, a njima su propisane kvantitativne vrijednosne ljestvice dobrote i time je vrednovanje kriterijima ekološke prihvatljivosti moguće kvantificirati.
- *Kvalitativno-kvantitativne*. Kod kvalitativno-kvantitativnih metoda i alata ulazni podaci mogu biti kvalitativni i kvantitativni ovisno o tome je li riječ o kvalitativnoj ili kvantitativnoj vrijednosnoj ljestvici, tj. kriterijima ekološke prihvatljivosti.
- *Kvantitativne*. Tipičan primjer kvantitativnih metoda vrednovanja ekološke prihvatljivosti jest metoda procjene životnog ciklusa (*LCA*) kojom se utjecaji na okoliš kvantificiraju u obliku jedinica utjecaja na okoliš, a u svrhu analize životnog ciklusa, usporedbe s referentnim proizvodom ili rekonstrukcije proizvoda.

Metode i alate ekodizajna razlikuju se i po tome je li metoda ili alat kompliciran za primjenu i koliko je zahtjevana implementacija pojedine metode ili alata. Kompliciranost primjene i razina kompleksnosti povezana s teškoćama koje se pojavljuju pri implementaciji metoda i alata ekodizajna ovise o parametrima [166] kao što su:

1. vrsta i brojnost ulaznih podataka koji su potrebni za primjenu metode ili alata,
2. vrijeme, troškovi te razina znanja i stručnosti koja je zahtijevana za pravilnu primjenu metode ili alata,
3. dostupnost informacija i podataka nužnih za pravovaljanu primjenu metode ili alata.

Razina znanja i stručnosti koja je zahtijevana za pravilnu primjenu metode ili alata može biti niska, srednja i visoka, a ovisi i o tome je li metoda ili alat namijenjen samo za jednog korisnika (konstruktora sa znanjem ili bez znanja o ekodizajnu) ili ih nužno primjenjuje multidisciplinarni tim u kojem su i ekodizajneri [167].

### 2.2.1. Kvalitativne metode

Kvalitativne metode i alati ekodizajna namijenjeni su ranim fazama procesa konstruiranja kada postoji potreba za prvim uvidom u utjecaje na okoliš, vrednovanje ekološke prihvatljivosti ili konsolidaciju daljnjih koraka razvoja, a poznato je malo podataka o proizvodu koji se razvija. Kvalitativne metode i alati jesu smjernice, liste kriterija ekološke prihvatljivosti i priručnici kojima se propisuju kriteriji ekološke prihvatljivosti na kvalitativan (opisni) način. Kvalitativne metode i alati mogu upućivati na potencijalne izvore pretjerano velikih utjecaja na okoliš ili upućuju na druge metode i alate (tablica 2.5.).

Smjernice ekodizajna jesu preporuke o strategijama ili principima za poboljšanje i unapređivanje rješenja proizvoda glede utjecaja na okoliš, bilo upućivanjem na aspekte životnog ciklusa koje treba uzeti u obzir tijekom oblikovanja proizvoda ili na način da upućuju na alternativna i ekološki prihvatljivija rješenja. *Ten Golden Rules* [121] ekodizajnerske su smjernice koje u 10 točaka opisuju općenite aspekte koje valja uzeti u obzir tijekom oblikovanja proizvoda. Smjernice su generičke (namijenjene razvoju tehničkih sustava), ali nedostatan detaljne u opisu kako ih primijeniti i ostvariti tijekom razvoja proizvoda.

Liste kriterija ekološke prihvatljivosti uređene su u obliku potvrdnih izjava o obilježjima proizvoda koja upućuju na ekološki prihvatljiv proizvod. Alternativno, liste

kriterija ekološke prihvatljivosti uređene su tako da propituju karakteristike proizvoda koje upućuju na probleme ili aspekte proizvoda povezane s neprihvatljivim utjecajima proizvoda na okoliš. Primjer liste kriterija ekološke prihvatljivosti jesu *Eco-design Checklist* [147], *Eco-design guidelines* [168] i *Strategy list* [169].

Kriteriji ekološke prihvatljivosti mogu biti grupirani prema fazama životnog ciklusa proizvoda na koje se odnose. Liste kriterija ekološke prihvatljivosti često se odnose na aspekte proizvoda koji zahtijevaju više informacija o proizvodu nego što ih uobičajeno ima u ranim fazama procesa konstruiranja. Zaključak je da takve liste kriterija nisu dovoljno učinkovita potpora ekodizajnu u fazi oblikovanja proizvoda ili vrednovanju ekološke prihvatljivosti u konceptualnoj fazi, nego im je zadatak da usmjere proces konstruiranja prema detaljnijoj analizi proizvoda i njegova životnog ciklusa [9].

**Tablica 2.5.** Obilježja kvalitativnih ekodizajn metoda i alata s obzirom na vrstu vrednovanja i svrhu metode (G – generiranje koncepata, A – analiza koncepata, R – rekonstrukcija)

Naziv metode ili alata	G	A	R	Vrednovanje
<i>Eco-Design Value guidelines</i> [82] – preskriptivne smjernice	■	■		nije namijenjena vrednovanju
<i>Ten Golden Rules</i> [121] – preskriptivne smjernice	■	■		nije namijenjena vrednovanju
<i>Eco-design Checklist</i> [147] – lista kriterija		■		kvalitativno
<i>Eco-design guidelines</i> [168] – lista kriterija		■		kvalitativno
<i>Strategy list</i> [169] - preskriptivna lista kriterija		■		nije namijenjena vrednovanju
<i>Design for Environment guidelines</i> [170] – preskriptivne smjernice	■	■		nije namijenjena vrednovanju
<i>Volvo's White, Grey and Black Lists</i> [171], [172], [173] – preskriptivne lista kriterija		■	■	kvalitativno
<i>Product Ideas Tree</i> [174] – alat za potporu generiranju ideja	■			nije namijenjena vrednovanju
<i>Pain Gain</i> [54] – alat za analizu i usporedbu ideja		■		kvalitativno-kvantitativno

### 2.2.2. Semikvantitativne metode

Tijekom procesa konstruiranja odluke se donose u skladu s često konfliktnim zahtjevima za maksimiranjem funkcionalnosti, a minimiziranjem troškova i utjecaja na okoliš [175] te za što manjim utjecajima na okoliš, potrošnjom energije i materijala, a ispunjavanjem svih sigurnosnih zahtjeva i propisa [176]. Byggeth i Hochschorner [46] analizirali su 15 alata ekodizajna kako bi otkrili podržavaju li procese odlučivanja u kojima je potrebno odlučiti o

povoljnijem rješenju, a na temelju zahtjeva ili kriterija kojima se opisuje optimalno rješenje. Spomenuti su autori alate za ekodizajn odabrali na temelju kriterija dobre dokumentiranosti alata u literaturi, na osnovi pokazatelja da se i u praksi primjenjuju u poduzećima te s obzirom na kriterij jednostavnosti primjene [46]. Kod tzv. jednostavnih metoda i alata vrijeme potrebno za prikupljanje podataka i primjenu alata iznosi 1 do 5 dana [84].

Kriteriji vrednovanja implementirani u alatima koje su Byggeth i Hochschorner [46] analizirali jesu kriteriji prema kojima se ideje, koncepti ili proizvodi vrednuju (npr. kriteriji kao što su „toksičnost“ ili „potrošnja energije“) ili se pak radi o strategijama za oblikovanje proizvoda. Strategije za ekološki prihvatljivo oblikovanje su primjerice smjernice „rabiti lokalno dostupne materijale za proizvodnju proizvoda“ i „izabrati tehnološke postupke proizvodnje s manje emisija“.

Alate koji propisuju smjernice, strategije ili procedure, Byggeth i Hochschorner svrstali su u kategoriju već spomenutih kvalitativnih alata za ekodizajn [46]. U tu su kategoriju svrstani *Ten Golden Rules* [121], *Strategy List* [169] i *Volvo's White, Grey and Black Lists* ([171], [172], [173]). Ti alati ne zadovoljavaju zahtjeve alata za potporu pri višekriterijskom odlučivanju te kada je vrednovanje potrebno provesti prema kriterijima ekološke prihvatljivosti, optimalnih troškova i održivosti rješenja [46].

Alati za ekodizajn razvijeni su za različite namjene: procjenu utjecaja na okoliš, otkrivanje kritičnih parametara utjecaja na okoliš tijekom životnog ciklusa proizvoda, usporedbu strategija ekodizajna, koncepata i proizvoda ili propisivanje strategija za unapređivanje slike utjecaja proizvoda na okoliš. Samo nekoliko alata koje su Byggeth i Hochschorner analizirali propisuje metode vrednovanja rješenja proizvoda te način dodjeljivanja ocjena ideji, konceptu ili proizvodu na temelju kriterija ekološke prihvatljivosti. Takve alate podijelili su u tri skupine prema vrsti ocjena dodijeljenih rješenjima proizvoda [46]. S obzirom na vrstu kriterija propisan je način vrednovanja (semikvantitativno vrednovanje), a ocjene prema parcijalnim kriterijima mogu biti:

- kvalitativne vrijednosti (*Econcept Spiderweb* [3], *LiDS-Wheel* [147], *Morphological Box* [147], *Dominance Matrix* [168], *EcoDesign Checklist* [168], *ABC-Analysis* [169], *Philips Fast Five Awareness* [177], i *Eco-products tool* [178],
- kvalitativne vrijednosti prema jednim kriterijima i kvantitativne vrijednosti prema drugim kriterijima propisanim alatom (*MET-Matrix* [147] i *MECO* [179]), ili
- kvantitativne vrijednosti (*ERPA* [20]).

*Philips Fast Five Awareness* [177] primjenjuju se pri vrednovanju i usporedbi koncepata proizvoda s obzirom na drugi referentni proizvod. Ova lista kriterija ekološke prihvatljivosti koja se primjenjuje za usporedbu koncepata jest lista pitanja podijeljenih u grupe kriterija koji se odnose na pojedine faze životnog ciklusa proizvoda. Na pitanja se odgovara pozitivnim ili negativnim odgovorom. Na temelju pozitivno odgovorenih odgovora bira se strategija poboljšanja koncepta. *Philips Fast Five Awareness* [177] lista kriterija ekološke prihvatljivosti za usporedbu koncepata lako se primjenjuje za semikvantitativno vrednovanje. Koncepti se vrednuju usporedno, a lista pitanja jasno određuje kriterije vrednovanja. Ako koncept zadovoljava određeni kriterij dodjeljuje mu se ocjena 1, a u suprotnome, ako ne zadovoljava određeni kriterij, dodjeljuje mu se ocjena 0. Pobjeđuje koncept s najvećim brojem pozitivnih odgovora, odnosno najvećom ukupnom ocjenom [46].

Kod metode *Dominance matrix (Paired Comparison)* [168] koncepti se uspoređuju u parovima – svaki sa svakim. Bolji se koncept ocjenjuje ocjenom 1, a onaj drugi ocjenom 0. Pobjeđuje koncept s najviše pozitivnih ocjena. Konstruktori (korisnici alata) sami definiraju kriterije ekološke prihvatljivosti kojima će se služiti za usporedbu koncepata proizvoda [24].

*LiDS-Wheel* [147] jest alat koji pruža okvir za sustavan pregled životnog ciklusa proizvoda. Može se također primjenjivati tijekom generiranja ideja kako bi taj proces usmjerio na razmatranje životnog ciklusa proizvoda, odnosno kritičnih mjesta i faza u tom ciklusu koji mogu uzrokovati utjecaje na okoliš. Vrednovanje i procjena grupirani su u 8 strategija, prvotno su prikupljene ukupno 33 smjernice od kojih je odabrano 8 [180]. Sve faze životnog ciklusa uzimaju se u obzir, a alat služi za pomoć pri poboljšavanju ekološkog učinka proizvoda na okoliš i potporu pri odlučivanju. Rezultati su prikazani grafički. Alat se uglavnom upotrebljuje za potporu kreativnom dijelu procesa konstruiranja, pomaže pri vizualizaciji učinka proizvoda na okoliš i služi za identificiranje mjesta za poboljšavanje proizvoda, odnosno životnog ciklusa proizvoda. Osam je kriterija i prema svakom kriteriju daje se ocjena 0 - 5. Na temelju ovog alata nastao je velik broj novih alata, primjerice *EcoASIT* [181].

*Econcept Spiderweb* [3] i *Philips Fast Five Awareness* [177] služe usporedbi koncepata proizvoda [9]. Atom *Econcept Spiderweb* [3] propisano je 8 kriterija i prema svakom kriteriju konceptu je moguće dodijeliti ocjenu na ljestvici od 0 do 6 [168].

*Eco-products tool* [178] namijenjen je usporedbi koncepata proizvoda. Koncept se vrednuje tako da se uspoređuje s nekim drugim referentnim konceptom. Ako koncept zadovoljava kriterij ocjenjuje se ocjenom 1, a, ako ga ne zadovoljava, ocjenom 0. Pobjeđuje

koncept s najviše pozitivnih ocjena [182]. Ekološki prihvatljivi proizvodi jesu oni koji su, prema 8 kriterija, na ljestvici od 0 do 5 vrednovani ocjenom od minimalno 2 te imaju prosjek ocjena svih kriterija 3 ili više.

Matrične metode i alati namijenjeni ranim fazama konstruiranja [159] jesu matrično uređene metode i alati za procjenu životnog ciklusa proizvoda. Kod takvih alata u jednoj dimenziji matrice (npr. redovi) popisuju se faze životnog ciklusa, a u drugoj dimenziji matrice (npr. stupci) konstruktori zapisuju aspekte i utjecaje na okoliš, odnosno kritične emisije, otpad i ispuštanja u okoliš koje očekuju u pojedinoj fazi životnog ciklusa. Pritom su korisnici alata primorani razmišljati o svakom elementu matrice, što im omogućuje osmišljavanje potencijalno boljih rješenja u svrhu poboljšanja ekofikasnosti i izbjegavanja neželjenih utjecaja na okoliš.

Jednostavnost matričnih alata razlog je njihove popularnosti u industriji. Glavni nedostaci ovakvih metoda i alata jesu praćenje procesa izbora i implementacije rješenja, nemogućnost procjene stvarnih utjecaja na okoliš i nemogućnost procjene kvalitete predloženih rješenja. Korisnici matričnih alata za rane faze konstruiranja koji nemaju dodatna stručna znanja o ekodizajnu i iskustva u primjeni određenog alata, lako zanemare važne aspekte proizvoda ili predloženih poboljšanja koji se tiču ekološke prihvatljivosti. S druge strane, može se dogoditi da ne primijete potencijalno dobra rješenja ili pak pogrešno procijene važnost i utjecaje na okoliš analiziranog proizvoda. Matrične metode stoga se smatraju dobrim pomoćnim alatima za generiranje ideja i rješenja, a manje se primjenjuju kao alati za analizu i procjenu utjecaja proizvoda na okoliš [9].

*ERPA* (engl. *Environmentally Responsible Product Assessment*) [20] svrstava se u kategoriju jednostavnijih alata za procjenu životnog ciklusa na okoliš. Riječ je o 5 x 5 matrici. Stupci matrice podijeljeni su na faze životnog vijeka (vađenje, nabava i proizvodnja sirovina, proizvodnja i sastavljanje proizvoda, prijevoz i distribucija proizvoda, eksploatacija i kraj životnog vijeka proizvoda). U redovima matrice zapisuju se kriteriji za procjenu životnog ciklusa, odnosno utjecaja proizvoda na okoliš. Kriteriji mogu biti ekološka prihvatljivost materijala, potrošnja energije tijekom eksploatacije proizvoda, toksičnost emisija, količina otpada i dr. U matrici se za svaku fazu i kriterij daju ocjene od 0 (znatni utjecaji na okoliš) do 4 (niski utjecaji na okoliš). Zbrojem svih vrijednosti u matrici dobije se ukupna vrijednost ekološke prihvatljivosti, a vrednuje se prema ljestvici od 0 do 100 [183].

*MET* (engl. *Material, Energy, Toxicity*) [147] služi za vrednovanje životnog ciklusa proizvoda. Problemi ili kritični utjecaji na okoliš svrstavaju se u kategorije: potrošnja

energije, toksične emisije i životni ciklus materijala. Kvalitativne informacije o proizvodu upisuju se za svaku kategoriju utjecaja na okoliš za pojedine faze životnog ciklusa. Detaljnost i kvaliteta informacija koje se upisuju u *MET* matricu ovise o znanju i iskustvu razvojnog tima koji provodi analizu proizvoda. *MET* matrica [147] zahtijeva znanje stručnjaka koji se bave problemima procjene utjecaja proizvoda na okoliš, a ponovljivost rezultata nije zadovoljavajuća, jer stručnjaci mogu doći do različitih zaključaka. Rezultati analize mogu se koristiti za predlaganje koraka poboljšanja proizvoda [73]. Spomenuta matrica [147] može se primijeniti zajedno s listom kriterija ekološke prihvatljivosti te time postati primjenjiva za generiranje novih ideja proizvoda, oblikovanje i konstruiranje ili odlučivanje o ekološki prihvatljivijim rješenjima proizvoda [9].

*MECO* (engl. *Material, Energy, Chemical and Others*) [179] upotrebljava se za identifikaciju ekološki kritičnih aspekata proizvoda. Nešto je jednostavnija od *ERPA* matrice [20] jer za nju nisu propisani načini ocjenjivanja numeričkim vrijednostima, nego kvalitativno. Ako postoje podatci, kvantifikacija utjecaja na okoliš koji se upisuju u pojedine matrične ćelije, računaju se sofisticiranijim metodama procjene životnog ciklusa proizvoda (*LCA* ili *SLCA*), a u suprotnome se vrednuju na temelju subjektivno dodijeljenih ocjena i važnosti utjecaja na okoliš [184].

Lagerstedt i drugi [184] smatraju da bi formiranje grupa proizvoda sa zajedničkim karakteristikama koje se tiču funkcionalnih značajki i onih koje determiniraju ekološki profil proizvoda, omogućilo vrednovanje ekološke prihvatljivosti proizvoda u ranim fazama razvoja. Također smatraju da bi opis proizvoda koji ne uključuje kvantitativne mjere, parametre ili specifikacije bio pogodniji za rane faze razvoja.

*Eco Functional Matrix* [185] matrica je u kojoj se analiziraju funkcionalni i ekološki profil proizvoda. Za sastavljanje svakog od profila definirano je 8 karakteristika koje opisuju proizvod glede njegove funkcionalnosti te 8 karakteristika koje opisuju ekološki profil proizvoda. Korisnici alata dodjeljuju kvalitativne ocjene karakteristikama proizvoda služeći se vrijednosnom ljestvicom od 0 do 10). Uz alat su priložene upute za dodjeljivanje ocjena prema vrijednosnoj ljestvici. Za karakteristike proizvoda koje se odnose na funkcije proizvoda, visoka je ocjena pokazatelj velike važnosti karakteristike, a kod karakteristike kojima se opisuje ekološki profil proizvoda, visoka ocjena označuje znatnost utjecaja na okoliš koji se mogu pripisati pripadajućoj funkciji proizvoda, tj. velike utjecaje na okoliš zbog realizacije funkcije proizvoda.

*Eco Functional Matrix* [185] primjenjuje se za identificiranje važnih veza između obilježja funkcionalnosti i ekološke prihvatljivosti proizvoda te služi unapređivanju, odnosno identifikaciji veza visoke ovisnosti među funkcionalnim i ekološkim karakteristikama proizvoda. Short i Lynch [186] su primjenom alata potvrdili mnoge prednosti, ali i nedostatke tog alata. Nakon što su ustanovljene kritične veze i ovisnost među funkcionalnim i ekološkim karakteristikama, nema smjernica ili uputa kako ih razriješiti. Pojedine karakteristike kojima se opisuje ekološka prihvatljivost proizvoda nisu jasne korisnicima alata [186]. Zbog toga što nije bilo prijedloga za rekonstrukciju nakon primjene alata [185], nije provedena usporedba poboljšanog proizvoda i proizvoda prije rekonstrukcije, pa primjenjivost alata nije vrednovana s tog aspekta [186].

**Tablica 2.6.** Obilježja semikvantitativnih ekodizajn metoda i alata s obzirom na vrstu vrednovanja i svrhu metode (G – generiranje koncepata, A – analiza koncepata, R – rekonstrukcija)

Naziv metode ili alata	G	A	R	Vrednovanje
<i>ABC-Analysis</i> [168] – analitička metoda		■		kvalitativno
<i>Dominance Matrix</i> [168] – metoda za usporedbu koncepata		■		kvalitativno, semikvantitativno
<i>Philips Fast Five Awareness</i> [177] – lista zahtjeva za usporedbu koncepata		■		kvalitativno, semikvantitativno
<i>Econcept Spiderweb</i> [3] – alat za usporedbu koncepata		■		kvalitativno, semikvantitativno
<i>Eco-compass</i> [187] – alat za usporedbu koncepata		■		kvalitativno, semikvantitativno
<i>LiDS-Wheel</i> [147] – alat za usporedbu koncepata		■		kvalitativno, semikvantitativno
<i>Morphological Box</i> [147] – metoda za generiranje koncepata	■		■	nije namijenjena vrednovanju
<i>ERPA</i> [20] – matrična metoda		■	■	kvalitativno-kvantitativno, kvantitativno
<i>MET-Matrix</i> [147] – matrična metoda		■		semikvantitativno
<i>MECO</i> [179] – matrična metoda		■		kvalitativno-kvantitativno
<i>Eco-products tool</i> [178] – metoda za usporedbu koncepata		■		semikvantitativno
<i>EcoASIT</i> [181] – metoda za generiranje novih ideja	■	■	■	semikvantitativno
<i>Eco Functional Matrix</i> [185] – matrična metoda za analizu proizvoda		■		semikvantitativno, kvalitativno-kvantitativno

Tablica 2.6. daje pregled semikvantitativnih metoda i alata ekodizajna. Od 15 alata koje su analizirali Byggeth i Hochschorner [46], osam njih propisuje kriterije koji se tiču životnog ciklusa proizvoda (*ERPA* [20], *LiDS-Wheel* [147], *MET-Matrix* [147], *ABC-Analysis* [168],



*EcoDesign Checklist* [168], *Strategy List* [168], *Philips Fast Five Awareness* [177] i *MECO* [179].

Ocjene koje se dodjeljuju prema kriterijima vrednovanja implementiranim u metodama *LiDS-Wheel* [147], *ABC-Analysis* [168], *EcoDesign Checklist* [168] i *Philips Fast Five Awareness* [177] jesu kvalitativne, a vrednovanje može biti semikvantitativno. Kod *ERPA* alata [20] ocjene koje se dodjeljuju prema kriterijima jesu kvantitativne. Kod *MECO* alata [179] ocjene prema dvama kriterijima dodjeljuju se kvalitativnom ocjenom, a ocjena je prema preostalom kriteriju kvantitativna.

Byggeth i Hochschorner [46] navode da je za primjenu semikvantitativnih alata ekodizajna potrebno imati općeniti uvid u životni ciklus proizvoda i utjecaje na okoliš. To je stoga što korisnik alata mora provesti dodatno prikupljanje informacija o utjecajima na okoliš te kako bi znao interpretirati rezultate. Samo 4 od 15 alata ekodizajna koje su Byggeth i Hochschorner [46] analizirali (*LiDS-Wheel* [147], *ABC-Analysis* [168], *Strategy List* [168] i *MECO* [179]), mogu se rabiti pri višekriterijskom odlučivanju. No, tim alatima nije propisana važnost kriterija ekološke prihvatljivosti, odnosno nije poznat redoslijed prioriteta među kriterijima vrednovanja.

### 2.2.3. Kvalitativno-kvantitativne metode

Vrednovanje prema zahtjevima korisnika ostvareno je putem *zelenih* inačica metode *Kuća kvalitete* [47], npr. [53], [188], [189], [190], [191]. *QFD* podržava proces konstruiranja pri oblikovanju i detaljiranju, odnosno pri rekonstrukciji i inkrementalnim poboljšanjima proizvoda [184], ali ne i pri generiranju ideja ili koncepata [2].

*QFD* pristupima nastoje se uključiti zahtjevi tržišta i korisnika, koji mogu biti vrlo složeni. Primjenjuju se u kombinaciji s metodama kao što su uspoređivanje s najboljima i metodama modeliranja potreba i zahtjev korisnika. Nadalje, uključivanjem korisničkih zahtjeva u vrednovanje ekološke prihvatljivosti proizvoda, pretpostavlja se da su korisnici „uvijek u pravu“ i da imaju dovoljno znanja da bi proveli vrednovanje proizvoda [184].

Zahtjevi korisnika imaju važnu ulogu u procesu konstruiranja [192], [193], jer se u pravilu koncepti i proizvod vrednuju prema njima, no i u mnoge druge svrhe [194]. Zahtjevi su obično nužni ulazni podatci metodama temeljenim na *QFD*-u. Preko *Kuće kvalitete* potrebe korisnika „prevode“ se u obliku tehničkih zahtjeva koje proizvod u konačnici treba ispuniti. Inženjeri koji sudjeluju u procesu konstruiranja imaju vrlo malo doticaja s korisnicima i prikupljanjem potreba korisnika što je obično zadatak odjela marketinga. Naime, razvoj

proizvoda obično se provodi usporedo s ostalim procesima razvoja poduzeća, nabavom materijala i komunikacijom s dobavljačima [92]. Modeliranje veza između utjecaja na okoliš i pojedinih komponenata te potom specifikacija temelje se samo na subjektivnoj interpretaciji inženjera, koji i inače ne razmatraju životni ciklus proizvoda primjerice tijekom definiranja specifikacija [102].

Cristofari i drugi [189] te Vindoh i Rathod [195] povezali su *LCA* i *QFD* čime su ostvarili kombinaciju prednosti *QFD* metode i prednosti metoda za kvantifikaciju utjecaja na okoliš. Sakao [53] je *QFDE* metodi (engl. *Quality Function Deployment for Environment*) [190] dodao *TRIZ* metodologiju [196] za rješavanje konflikata u *Kući kvalitete*. Vrednovanje i razvoj ekološki prihvatljivih proizvoda temelji se na ocjenama važnosti funkcija proizvoda, koje daju potencijalni korisnici proizvoda. *LCA-QFDE-TRIZ* [53] obuhvaća *LCA* analizu proizvoda kako bi se dobio uvid u utjecaje na okoliš. Neprimjereni i vrijednosno značajni utjecaji na okoliš su ulazni podatci u *Kući kvalitete*, te zamjenjuju ulogu zahtjeva korisnika. Kontradikcije između *LCA* podataka i tehničkih specifikacija prikazuju se *QFDE* matricom. Po uzoru na *LCA-QFDE-TRIZ* [53], Fitzgerald i drugi [61] demonstrirali su primjenjivost *TRIZ* metodologije za predlaganje rješenja matrice kontradikcija.

Podatci o obliku, materijalima, reciklabilnosti i rastavlјivosti proizvoda, često su nužni za ocjenjivanje proizvoda prema zahtjevima i tehničkim specifikacijama u ekološki prihvatljivoj inačici *QFD* metode. Puglieri i drugi [49] ustanovili su da takvi podatci i podatci za provedbu *LCA* metode u pravilu nisu dostupni u konceptualnoj fazi razvoja proizvoda. Zahtjevi korisnika i parametri koji se tiču faze eksploatacije proizvoda [48] izostavljeni su iz ekološki prihvatljivih inačica *QFD* metoda [49].

Zahtjevi su ekološke prihvatljivosti u *QFD* metodama kvalitativni ili kvantitativno opisuju parametre na temelju kojih je moguće novi proizvod usporediti s referentnima. Za donošenje zaključka o ekološkoj prihvatljivosti ili neprihvatljivosti rješenja, potrebno je definirati način vrednovanja prema svim vrstama kriterija – kvalitativnim i kvantitativnim. To otvara mogućnost odabira metode kojom će se ocjene koncepta prema pojedinim kriterijima agregirati u jedinstvenu ocjenu ekološke prihvatljivosti koncepta. Byggeth i Hochschorner [46] smatraju da bi se trebalo koristiti drugim, sofisticiranijim metodama kojima bi se omogućila konzistentnost vrednovanja, no ne definiraju koje bi to bile.

*Ecodesign PILOT* [140] jest računalom podržani alat koji integrira nekoliko metoda radi dobivanja inicijalne procjene ekološke prihvatljivosti proizvoda. Nakon unosa podataka o proizvodu preko liste kriterija ekološke prihvatljivosti, alat grupira proizvod u jednu od 5

grupa proizvoda prema, po utjecaju na okoliš dominantnoj fazi životnog ciklusa. Sukladno pripadajućoj grupi, ponuđene su smjernice i prijedlozi za poboljšanje slike utjecaja na okoliš. Grupe čine proizvodi s najznačajnijim utjecajima u pojedinim fazama životnog ciklusa proizvoda. Analiza proizvoda temeljena je na kvalitativnim, ali i kvantitativnim podacima o proizvodu (komponentama, potrošnji energije tijekom eksploatacije, odlaganju proizvoda itd.) [140]. Spomenutim alatom nije moguće razmatranje i usporedba ekološke prihvatljivosti više od jednog koncepta ili proizvoda odjednom, što ga čini nepovoljnim za usporedbu ekološke prihvatljivosti konceptata.

### 2.2.4. Kvantitativne metode

Među metodama i alatima ekodizajna posebno se ističu *LCA* metode koje mogu služiti vrednovanju ekološke prihvatljivosti na temelju utjecaja na okoliš u životnom ciklusu proizvoda, a tijekom rekonstrukcije proizvoda [3], odnosno zaključivanje o tome je li nova generacija proizvoda ekološki prihvatljivija od prethodne [35].

Istraživanja koja se bave razvojem metodologija za procjenu utjecaja proizvoda na okoliš u konceptualnoj fazi procesa konstruiranja i razvoja proizvoda mogu se općenito podijeliti u dvije skupine. Prva skupina istraživača razvija metodologije kojima se na temelju zajedničkih funkcija i komponenata koncepta i komercijalnog proizvoda može zaključivati o utjecajima na okoliš [25], [35], [52], [197]. Bohm i drugi [25] demonstrirali su kako procijeniti utjecaje na okoliš konceptata proizvoda grupiranjem konceptata proizvoda u grupe po utjecajima na okoliš sličnih proizvoda, a na osnovi zajedničkih funkcionalnih obilježja i karakteristika komponenata. Devanathan i drugi razvili su metodu kojom je moguće povezati utjecaje proizvoda na okoliš s funkcijama proizvoda preslikavanjem preko matrice funkcija i utjecaja na okoliš [50], [52], [198]. Gilchrist [199] je demonstrirao procjenu utjecaja na okoliš u konceptualnoj fazi na temelju digitalno pohranjenih podataka već komercijalnih proizvoda i njihovih *LCA* analiza.

Za *LCA* su nužni stvarni podatci dobiveni mjerenjem potrošnje materijala i energije, na stvarnim lokacijama na kojima se proizvod proizvodi, no korištenjem podataka iz već postojećih baza podataka s uniformiranim podacima o procesima, moguće je napraviti dovoljno približnu procjenu utjecaja, a uz manje troškova, vremena i ostalih resursa potrebnih za prikupljanje podataka [200]. Procjena se u tom slučaju temelji na funkcionalnim zahtjevima za proizvod, koji su poznati u ranim fazama razvoja. Na osnovi povezivanja funkcijskih zahtjeva i tehničkih parametara (kao što su oni zapisani u listi materijala

proizvoda) generiraju se ulazni podatci za procjenu životnog ciklusa proizvoda. Podatci o obliku i arhitekturi generiranih rješenja proizvoda mogu biti dostupni iz kataloga i digitalnih baza u kojima su pohranjene generičke funkcije, glavni sklopovi i komponente proizvoda.

Druga skupina istraživača razvija metodologije kojima se procjena utjecaja na okoliš temelji na definiranju grupa proizvoda s karakterističnim utjecajima na okoliš proizvoda u grupi [18], [30], [60], [201], [202], [203]. Kota i Chakrabarti [204] proučavaju mogućnosti primjene neizrazite logike pri procjeni životnog ciklusa proizvoda, a radi smanjivanja nesigurnosti prilikom odlučivanja u kvalitativnim ranim fazama razvoja proizvoda.

Zhou i drugi [205] identificirali su potrebu za razvojem metoda za procjenu utjecaja na okoliš u ranim fazama konstruiranja i razvoja proizvoda te metoda za izbor materijala uzimajući u obzir tehničke, ekonomske i ekološke značajke materijala. Eddy i drugi [206] također se bave razvojem metoda za vrednovanje ekološke prihvatljivosti proizvoda, tj. vrednovanje ekološke prihvatljivosti materijala za izradu komponenata proizvoda pri izboru materijala za proizvodnju. Utjecaji na okoliš uzrokovani izborom materijala smatraju se jednim od najznačajnijih vrsta utjecaja na okoliš te jednim od najmanje kompliciranih za vrednovanje, a zbog toga što je pitanje odabira materijala fundamentalno važno za konstruiranje i razvoj proizvoda, pa je proučavanje vrednovanja ekološke prihvatljivosti s aspekta izbora materijala za proizvodnju oduvijek prisutno u istraživanjima [74], [207].

Bohm i drugi [25] dali su doprinos primjeni *LCA* metode u ranim fazama razvoja proizvoda tako da su razvili metodologiju za procjenu utjecaja na okoliš virtualnih koncepata. Utjecaji na okoliš koncepata generiranih tijekom konceptualne faze procjenjuju se na temelju *LCA* podataka sličnih proizvoda pohranjenih u digitalnoj bazi proizvoda *Design Repository – DR* [208]. Procjena utjecaja virtualnih koncepata proizvoda na okoliš omogućena je pretragom baze podataka i pronalaskom odgovarajućih (usporedivih) podataka za virtualne koncepte [25]. Podatci o proizvodima pohranjeni su u digitalnoj bazi podataka čime se omogućuje sastavljanje inventara životnog ciklusa virtualnih koncepata proizvoda.

*Design Repository – DR* [208] razvijen je na Sveučilištu Oregon s nastojanjem da se pruži potpora inovacijama u ranoj fazi procesa konstruiranja. On sadržava podatke o komponentama proizvoda kao što su dimenzije, masa, materijal, tehnološki proces izrade komponente, funkcija i veza s drugim komponentama u sklopnoj konfiguraciji proizvoda. Na temelju podataka pohranjenih u *DR-u* omogućeno je generiranje matrice korelacija funkcije – komponente proizvoda [209]. Matrica funkcije – komponente dalje služi za generiranje matrice funkcije – utjecaji na okoliš. Time je omogućeno dodjeljivanje korelacija između

funkcija virtualnih koncepata i utjecaja na okoliš. *DR-om* je omogućena pohrana funkcionalnih dekompozicija proizvoda kako bi se rabile prilikom generiranja novih proizvoda. Za *Design Repository – DR* primijenjena je metoda modeliranja funkcija [210] kojom je propisan leksikografski format zapisivanja funkcija u obliku glagol – imenica. Za zapisivanje funkcija proizvoda uporabljena je taksonomija generičkih funkcija (engl. *Functional Basis*) [211]. Ulazni i izlazni tjkovi energije, materijala i signala pridružuju se funkcijama koje predočuju operacije nad ulaznim tjkovima koji se transformiraju u izlazne tjkove i efekte, čime se opisuju parcijalne zadaće proizvoda [210]. Komponente proizvoda označuju tehničko rješenje za ostvarivanje funkcija, pa su podatci o funkcijama i komponentama zapisane u *DR-u*.

Koristeći se generičkim načinom zapisivanja funkcija proizvoda i taksonomijom funkcija i tjkova energije, materijala i signala potrebnih za funkcionalnu dekompoziciju [211], moguće je pohraniti i pretraživati bazu funkcija i komponenata proizvoda, te se njome služiti tijekom razvoja novih koncepata i proizvoda. Detaljnost podataka o proizvodu omogućuje analizu proizvoda i ponovnu upotrebu informacija o proizvodu. U bazi *DR* nalaze se poveznice na dokumente povezane s proizvodom, model funkcija, sklopni model i vizualni prikaz komercijalnoga proizvoda [212].

Bohm i drugi [213] nastojali su postići kompatibilnost *DR-a* i *CAD* alata, čime su postigli povećanje učinkovitosti *DR* sustava i integriranost sa sustavima računalom podržanih alata za konstruiranje. Prikupljanje i zapisivanje informacija o proizvodu najzahtjevniji je korak razvoja *DR-a*. Informacije o proizvodu zapisane u bazi *DR* uključuju opis, naziv komponente, ulazni tjkovi, funkcije, fizikalne značajke i parametre komponenata, podatke o životnom vijeku komponente itd. [213].

Rocco i drugi [214] demonstrirali su aproksimaciju utjecaja proizvoda na okoliš u konceptualnoj fazi razvojnoga procesa koristeći se metodom *Design Structure Matrix – DSM*. *DSM* matrice služe za analizu veza između funkcija proizvoda i procijenjenih utjecaja na okoliš, te interakcija između proizvoda i okoliša [214].

Devanathan i drugi [198] koriste se matricom funkcija i s njima povezanih utjecaja na okoliš kako bi identificirali funkcije koje najviše pridonose utjecajima proizvoda na okoliš zbog komponenata i popratnih resursa koji uzrokuju te utjecaje, a radi predlaganja rekonstrukcijskih rješenja za smanjivanje utjecaja na okoliš [52]. U studiji slučaja Devanathan i drugi [198] pokazali su da je moguće provesti rekonstrukciju proizvoda bez negativnih utjecaja na njegovu funkcionalnost. Ti su se autori [198] koristili metodologijom za rane faze

procesa razvoja proizvoda naziva *Function Impact Method – FIM*. *FIM* metodologija primjenjuje se za smanjivanje utjecaja proizvoda na okoliš koji nastaju u fazi proizvodnje. Primjenom ove metodologije konstruktori mogu analizirati koji utjecaji na okoliš nastaju zbog kojih funkcija proizvoda povezujući utjecaje na okoliš s ključnim sklopovima i komponentama proizvoda koji ih uzrokuju.

Ramanujan i drugi [215] u studiji slučaja proučavaju *Function Impact Method - FIM* metodu [50]. Rekonstrukcija proizvoda potpomognuta *FIM* metodom sastoji se od četiriju koraka: rastavljanje proizvoda, analiza komponenata proizvoda i njihovih karakteristika (masa i materijal), izrada liste materijala proizvoda (engl. *Bill of Materials – BOM*) te popisivanje tehnoloških postupaka izrade proizvoda. Ramanujan i drugi [215] zaključili su da je izrada liste materijala ključna za provođenje procjene utjecaja proizvoda na okoliš (*LCA*).

Gilchrist [199] je pokazao da je moguće modelirati reprezentativni inventar podataka za procjenu utjecaja na okoliš koji bi služio generiranju novih koncepata proizvoda. Nizom istraživanja različitih proizvoda prikupljeni su podatci potrebni za procjenu utjecaja na okoliš (*LCA*) te su pohranjeni u digitalnu bazu podataka *Design Repository – DR* [208]. Značajke proizvoda i njihovih parcijalnih rješenja koja su smatrana inovativnima zabilježene su [199]. Naknadnom analizom inovativnih proizvoda i njihovih utjecaja na okoliš, ustanovljeno je da inovativni proizvodi imaju veći utjecaj na okoliš od proizvoda koji nisu imali značajke inovativnih rješenja. Gilchrist [199], nadalje, opisuje da su takvi neprimjereno veliki utjecaji na okoliš koncentrirani u samo nekoliko funkcija proizvoda.

Oman i drugi [197] razvili su metodologiju koja služi konstruktorima pri generiranju novih koncepata. Riječ je o nastavku istraživanja Gilchrista i drugih [35] usmjerenog na otkrivanje korelacija između inovativnih karakteristika proizvoda glede funkcija i komponenata proizvoda te utjecaja na okoliš. Znanje o ekološki prihvatljivim inovativnim karakteristikama proizvoda iskorištava se za računalom podržano generiranje inovativnih i ekološki prihvatljivih koncepata.

Lee i Melkanoff [216] predložili su formiranje grupa proizvoda sa sličnim utjecajima na okoliš, to na osnovi duljine životnog vijeka proizvoda. Na temelju analize već komercijalnih proizvoda, njihovih karakteristika i prije provedenih procjena utjecaja na okoliš (*LCA*) proizvoda formiraju se grupe u kojima su proizvodi grupirani prema sličnim karakteristikama [59] i utjecajima na okoliš. Koncepte proizvoda generirane u konceptualnoj fazi na temelju njihovih karakteristika moguće je svrstati pripadajuću grupu proizvoda.

Kako bi se neki novi koncept proizvoda uspjelo svrstati u pripadajuću grupu proizvoda sa sličnim utjecajima na okoliš, razvijene su tzv. familije proizvoda. Proizvode u pojedinoj familiji proizvoda karakteriziraju zajedničke funkcije, komponente ili neke druge značajke. Dahmus i drugi [217] te Alizon i drugi [218] proučavali su načine kako taj proces automatizirati preko generičkih funkcionalnih značajki proizvoda, a Thevenot i Simpson [219] preko značajki tehnološke pripreme proizvoda za masovnu proizvodnju. Collado-Ruiz i Ostad-Ahmad-Ghorabi [201] razvili su generičke familije proizvoda prema sličnosti životnih ciklusa proizvoda te ustanovili ciljne vrijednosti utjecaja na okoliš pojedinih generičkih grupa proizvoda.

Sousa i drugi [62], koristeći se metodom modeliranja umjetne neuronske mreže radi stvaranja optimalnog modela proizvoda koji upućuje na utjecaje proizvoda na okoliš na temelju ranije definiranih grupa proizvoda, razvili su metodu kojom se omogućuje generiranje modela proizvoda i utjecaja na okoliš namijenjenih za rane faze konstruiranja i koncepte proizvoda. Sousa i Wallace [18] razvili su pak metodu za klasifikaciju optimiziranih modela proizvoda koristeći se metodama umjetne inteligencije i učenja na temelju prije definiranih grupa proizvoda sa sličnim utjecajima na okoliš.

Fitch i Cooper [60] analizirali su metodologije za procjenu utjecaja proizvoda na okoliš u konceptualnoj fazi i zaključili da nisu jednako primjenjive za originalne, adaptivne i varijantne koncepte proizvoda [72]. Kod originalnih koncepata proizvoda razlike u funkcijama i radnim principima između novog koncepta i referentnih proizvoda prevelike su za aproksimaciju utjecaja na okoliš na temelju podataka o referentnim proizvodima.

### **2.3. Metode procjene utjecaja na okoliš**

Kako bi se donijela najbolja odluka o načinu smanjivanja utjecaja proizvoda na okoliš, potrebno je provesti vrednovanje utjecaja proizvoda na okoliš. Procjenom životnoga ciklusa proizvoda (*LCA*) postiže se kvantificiranje ulaznih i izlaznih tjevoja energije i materijala povezanih s proizvodom, uslugama ili procesima koji su predmet analize. Kvantificiranje utjecaja na okoliš provodi se za svaku fazu životnog vijeka proizvoda [1]. Odabir mjernih jedinica za kvantifikaciju utjecaja na okoliš ovisi o svrsi provođenja procjene utjecaja na okoliš: radi rekonstrukcije proizvoda, izvještavanja o učincima poduzeća ili certificiranja proizvoda. Primjerice, riječ je o potrošnji energije pri proizvodnji materijala [220], ugljičnom otisku [133], potrošnji vode i vodenom otisku [221] ili o emisijama stakleničkih plinova [222].

Procjena utjecaja na okoliš preduvjet je za identificiranje kritičnih utjecaja na okoliš, traženje rješenja za njihovo otklanjanje ili smanjivanje te rekonstrukciju proizvoda sa svrhom poboljšanja ekološke prihvatljivosti. Odluka o ekološki prihvatljivijim alternativama i rješenjima donosi se usporedbom procijenjenih utjecaja na okoliš proizvoda i utjecaja na okoliš referentnih proizvoda [119], [223]. Stupanj poboljšanja moguće je kvantificirati u mjernim jedinicama utjecaja na okoliš [8].

### 2.3.1. Metoda procjene životnog ciklusa (LCA)

Procjenom životnog ciklusa nastoje se analizirati utjecaji na okoliš koji nastaju zbog procesa koji čine životni ciklus proizvoda. Procjena se provodi sastavljanjem inventara životnog ciklusa koji čine emisije, potrošnja materijala i energije, a utjecaji na okoliš zatim se računaju posebnim metodama kojima se kvantitativno procjenjuje učinak ili djelovanje na zdravlje ljudi, okoliš i iskorištavanje resursa [86].

Podatci o procesima na temelju kojih se računaju utjecaji na okoliš sadržani su u licenciranim bazama podataka koji sadržavaju informacije o generičkim procesima i utjecajima na okoliš. Proces i su specifični za državu, razdoblje tijekom kojeg su prikupljeni podaci o procesima te industriju (farmaceutska, automobilska, ...) [224]. *LCA* su prihvatili zakonodavna tijela, znanstvenici i korisnici te je prepoznata kao temelj za definiranje kvalitete proizvoda i procesa glede njihove ekološke prihvatljivosti [225]. Primjenjuje se za razvoj i unapređivanje proizvoda, strategijsko planiranje, odlučivanje u javnom sektoru i za oglašavanje proizvoda, razvoj politike zaštite okoliša poduzeća, ekološko označivanje proizvoda, odlučivanje tijekom razvoja proizvoda i za poboljšavanje proizvodnih sustava, marketing te razvoj vladine politike i regulative u vezi sa zaštitom okoliša.

Procjene životnog ciklusa mogu se primjenjivati u razvojnim i proizvodnim poduzećima ili organizacijama iz javnog ili privatnog sektora. Na temelju rezultata *LCA* moguće je definirati zahtjeve koji se tiču ekološke prihvatljivosti, a mogu poslužiti konstruktorima tijekom razvoja proizvoda kako bi se utvrdili najznačajniji utjecaji, djelovanja i učinci na okoliš koji nastaju tijekom životnog ciklusa proizvoda. Menadžmentu poduzeća rezultati *LCA* mogu biti smjernica za rukovođenje projektima usavršavanja proizvoda i proizvodnje, a sa svrhom smanjivanja potrošnje resursa, rizika istjecanja opasnih tvari u okoliš, smanjivanja otpada i emisija zbog eksploatacije proizvoda ili tijekom proizvodnje. *LCA* je instrument kojim se može mjeriti ekološka djelotvornost proizvoda tijekom njihova životnog vijeka ili pomoći u poboljšanju ekološke djelotvornosti. Rezultati *LCA* također se mogu koristiti



tijekom definiranja politike zaštite okoliša, javnoga zdravlja i programima ekološkog označavanja proizvoda i proizvodnih procesa.

Procjena životnog ciklusa omogućuje vrednovanje utjecaja na okoliš i usporedbu utjecaja na okoliš varijanata proizvoda [226]. Procjena životnog ciklusa može također voditi prema unapređivanju proizvoda jer pomaže generiranju informacija koje bi bile temelj za odlučivanje tijekom razvoja novih proizvoda ili rekonstrukcije [9] te zbog toga što zahtjeva da se više pozornosti posveti razmatranju funkcija proizvoda. Pri analizi već komercijalnog (referentnog) proizvoda naglasak nije isključivo na otkrivanju veze između karakteristika proizvoda (kao što su oblik, struktura i komponente proizvoda) i utjecaja na okoliš, nego na otkrivanju potrošnje resursa (energije i materijala) u životnome ciklusu proizvoda.

Procjena se životnog ciklusa proizvoda provodi retroaktivno. S obzirom na već poznati (komercijalni) proizvod i njegove utjecaje na okoliš, moguće je procijeniti utjecaje na okoliš novoga proizvoda tijekom konstruiranja i razvoja te donijeti odluke za poboljšavanje slike utjecaja na okoliš prije proizvodnje. *LCA* se ne može primijeniti tijekom ranih faza razvoja novih proizvoda [53]. Stoga se za tu svrhu primjenjuju pojednostavnjene inačice metode koje se kombiniraju s metodama višekriterijskog odlučivanja [227].

Ograničenje *LCA* je što se njome može mjeriti utjecaj tehnologija primijenjenih za proizvodnju i transport proizvoda, ali ne i na isti način procijeniti odabir proizvoda ili usluga temeljen na razmatranju troškova (troškova proizvodnje ili ukupnih troškova životnog ciklusa) ili odabir temeljen na razmatranju ekonomskih pokazatelja uspješnosti proizvoda na tržištu [133]. Opće poteškoće i ograničenja vrednovanja ekološke prihvatljivosti proizvoda pomoću metoda procjene životnog ciklusa [228] jesu sljedeće:

### *I. Definiranje ciljeva i opsega studije*

Troškovi *LCA*-a mogu biti previsoki za mala i srednja poduzeća. Kompleksni proizvodi (proizvodi sa složenim životnim ciklusima i većim brojem funkcija, npr. automobili) zahtijevaju opsežnije analize zbog čega su i vremenski zahtjevnije. *LCA* može zahtijevati više vremena nego li je to predviđeno rokovima procesa razvoja, napose kod kratkih razvojnih ciklusa.

### *II. Prikupljanje podataka za analizu inventara životnog ciklusa*

Dostupnost podataka i pristup podacima mogu biti ograničavajući čimbenici (npr. vlasništvo nad podacima). Problemima kvalitete podataka kao što su pristranost, točnost,

preciznost i potpunost ne pristupa se uvijek najprikladnije jer je za kvalitetno sastavljanje i analizu inventara životnog ciklusa potrebna visoka razina znanja o *LCA* metodi i alatima.

### III. Procjena utjecaja na okoliš

Složeni modeli i parametri metoda za procjenu utjecaja na okoliš nisu u svim slučajevima raspoloživi procjeniteljima. Modele koji se primjenjuju u procjeni životnog ciklusa često je potrebno prilagoditi specifičnostima proizvoda koji je predmet istraživanja. To je zadatak koji zahtijeva visoku razinu znanja o raspoloživim modelima i alatima. Analize neizvjesnosti malokad se provode jer su vremenski zahtjevne.

### IV. Tumačenje i komunikacija rezultata procjene

Donositeljima odluka u procesu razvoja proizvoda često nedostaje znanje o vrstama i klasifikaciji utjecaja na okoliš, zbog čega je otežano pravovaljano korištenje rezultatima istraživanja u svrhu odlučivanja o proizvodu i njegovu životnom ciklusu. Primjena neodgovarajuće metode grupiranja utjecaja na okoliš u kategorije utjecaja na okoliš mogu iskriviti rezultate procjene. Prikaz rezultata procjene utjecaja na okoliš u jedinstvenoj kategoriji utjecaja na okoliš nije preporučen zbog toga što kategorije utjecaja na zdravlje, eko-sustav i potrošnju resursa nisu međusobno aditivne. Tumačenje rezultata procjene stoga je uobičajeno potpomognuto definiranjem kriterija i temelja usporedbe kategorija utjecaja na okoliš [226].

Analitički i kvantitativni pristup vrednovanju ekološke prihvatljivosti kakav zahtijeva metoda procjene životnog ciklusa (*LCA*) omogućuje uvid u utjecaje na okoliš proizvoda tijekom njegova životnog ciklusa i analizu tog utjecaja. Ograničenja *LCA* metode sa stajališta neposredne primjene metode u procesu konstruiranja uvjetovane su metodološkim odlikama *LCA* metode [39], [85]. Kako bi se *LCA* primijenila u procesu konstruiranja potrebno je donijeti brojne pretpostavke o procesima, potrošnji energije i materijala tijekom životnog ciklusa proizvoda, tjelovima materijala i energije u pojedinim fazama životnog ciklusa, o granici sustava, o kvaliteti podataka u inventaru životnog ciklusa proizvoda te o kriterijima usporedbe rezultata temeljenih na procjeni utjecaja prema kategorijama utjecaja na okoliš.

Da bi rezultati procjene životnog ciklusa različitih proizvoda bili usporedivi, potrebno je usporediti proizvode koji ostvaruju istu funkciju. Definiranje funkcionalne jedinice za usporedbu proizvoda u prvom metodološkom koraku *LCA* preduvjet je za ostvarivanje usporedivosti rezultata procjene životnih ciklusa proizvoda, odnosno alternativa koje se

uspoređuju [229]. Tako su Collado-Ruiz i Ostadt-Ahmad-Ghorabi razvili metodu za pomoć pri definiranju funkcionalne jedinice [230]. Cluzel i drugi [231] pokazali su da se odabir funkcionalne jedinice temelji na subjektivnom izboru osobe koja provodi *LCA* studiju proizvoda. U istraživanju Cluzela i drugih [231], čak 5 od 8 *LCA* stručnjaka koristilo se različitim funkcionalnim jedinicama za isti proizvod.

Procjena životnog ciklusa temelji se na podacima o proizvodu u inventaru životnog ciklusa koji čine samo dio slike ukupnih utjecaja na okoliš. Naime, tijekom definiranja granice sustava i procesa u životnom ciklusu proizvoda često je nemoguće ustanoviti sve utjecaje na okoliš [229]. Odabir relevantnih kategorija utjecaja na okoliš temelji se na procjeni dominantnih utjecaja na okoliš, a te pretpostavke proizlaze iz prijašnjih istraživanja utjecaja na okoliš referentnih proizvoda. Rezultati *LCA* stoga su definirani s obzirom na specifične analizirane procese, materijale i sirovine te potrošnju energije, koji ovise među ostalim i o geografskom položaju, tehnologiji i drugim parametrima životnoga ciklusa referentnih proizvoda.

Tijekom razvoja novih proizvoda potrebno je osigurati nekoliko iteracija procjene životnog ciklusa proizvoda. Tri su bitna ograničenja u vezi s neposrednom primjenom procjene životnog ciklusa u ranim fazama procesa konstruiranja [233]:

1. nedostupnost podataka o proizvodu i njegovom životnom ciklusu tijekom ranih faza konstruiranja i razvoja proizvoda,

Nedostupnost podataka u ranim je fazama procesa konstruiranja uobičajena te se *LCA* radije provodi nakon konstrukcijske razrade ili završetka analize već komercijalnog proizvoda.

2. rezultati procjene životnog ciklusa podložni su interpretaciji,

Za provedbu procjene životnog ciklusa potrebno je donijeti pretpostavke o opsegu studije, a najčešće nije moguće procijeniti kako pretpostavke i utjecaji na okoliš koji nisu uključeni u opseg studije utječu na procijenjene utjecaje na okoliš. Bez pomoći stručnjaka, konstruktori ne mogu procijeniti jesu li i u kojem iznosu značajne posljedice odabira granice sustava i faza životnog ciklusa proizvoda. Iscrpnija analiza ovih za *LCA* važnih parametara vremenski je prezahtjevna za rane faze konstruiranja.

3. nekompatibilnost računalom podržanih alata za procjenu životnog ciklusa, računalom podržanih sustava (engl. *Product Data Management* – PDM) i alata za razvoj proizvoda (engl. *Computer Aided Design* – CAD).

Proces integracije *LCA* softverskih rješenja i postojećih *PDM* i *CAD* sustava u poduzećima iziskuje dodatne resurse i ulaganja. *LCA* softverska rješenja nedovoljno su kompatibilna s računalom podržanim sustavima i alatima koji se upotrebljavaju tijekom konstruiranja i razvoja proizvoda [57], [234].

Procjena životnog ciklusa proizvoda provodi se prema standardiziranim smjernicama za procjenu [1]. Trenutačno ne postoje smjernice koje bi konstruktorima olakšale primjenu *LCA*-a te bile potpora procesu odlučivanja o tome koje procese životnog ciklusa, tjekeve energije i materijala te utjecaje na okoliš uključiti pri analizi, odnosno koje je uputno izostaviti iz analize jer su zanemarivo mali u usporedbi sa ostalima [235]. Također nema smjernica o tome kako modelirati utjecaje na okoliš koji proizlaze iz procesa poput onih čestih u uslužnom ili tržišnom sektoru, a koji nisu izravno povezani s proizvodom. Takvi utjecaji na okoliš nastaju zbog potrošnje energije i materijala tijekom procesa koji se mogu dovesti u vezu i pridijeliti pojedinim fazama životnog ciklusa proizvoda (primjerice distribucijom proizvoda, uslugama servisa, popravaka i održavanja proizvoda tijekom korisnog vijeka proizvoda) [235].

Utjecaji na okoliš koji nastaju zbog potrošnje energije i materijala tijekom životnog ciklusa proizvoda, a zanemareni su tijekom analize ekološke prihvatljivosti proizvoda zbog nedostupnosti podataka, razmatrani pojedinačno mogu rezultirati malim odstupanjima u rezultatima procjene životnog vijeka. No, kumulativno, takvi utjecaji na okoliš mogu znatno utjecati na konačne rezultate procjene ekološke prihvatljivosti proizvoda. Nadalje, analiza mogućih utjecaja na zdravlje ljudi i utjecaja na kvalitetu ekosustava zahtjeva dodatne studije utjecaja na okoliš [224] jer je uobičajeno riječ o utjecajima na okoliš specifičnima za pojedini proizvod, poduzeće i specifičnosti razvojnoga procesa.

### 2.3.2. Procjena potrošnje energije i materijala u životnom ciklusu proizvoda

Ness i drugi [236] podijelili su pristupe i alate za računanje održivosti u tri kategorije, prema tome razmatra li se održivost (ekološka prihvatljivost) proizvoda i procesa retroaktivno (pokazatelji ili indikatori), u realnome vremenu tijekom razvoja proizvoda (integrirani) ili se vrednovanje i usporedba proizvoda ili procesa obavljaju u realnome vremenu tijekom razvoja uz predviđanje pokazatelja održivosti novih razvojnih projekata.

Za poduzeća je izvještavanje o okolišu obavezno, a ono obuhvaća izvještavanje o ključnim pokazateljima promjene kvalitete okoliša koja nastaje zbog životnog ciklusa proizvoda i procesa. Pokazatelji (indikatori) u praćenju promjena u okolišu služe za praćenje kvalitete okoliša i ostvarivanje ciljeva poduzeća. Nadalje, služe za praćenje socioekonomskih i okolišnih trendova tijekom procesa razvoja proizvoda glede održivosti procesa [237].

Pokazatelji su sastavni dio normi za izvještavanje o utjecaju na okoliš te su određeni za sljedeća područja okoliša: energetska djelotvornost (efikasnost), djelotvorna uporaba materijala i resursa, otpad, emisije, biološka raznolikost i uporaba zemljišta [133]. Pokazatelji su temeljeni na nekim od brojnih kriterija kvalitete procesa te se uporabljaju pri vrednovanju održivosti i ekološke prihvatljivosti proizvoda i procesa retroaktivno (s obzirom na prijašnje proizvode i procese) ili su dio integriranih metoda za praćenje i procjenu održivosti i ekološke prihvatljivosti u realnom vremenu tijekom razvojnoga procesa. Pokazatelji služe za prikaz djelovanja između industrijskih i ekoloških sustava na lokalnim, regionalnim ili globalnim razinama sustava. Detaljniji pregled pokazatelja (indikatora) održivosti može se naći u radu Katesa i drugih [238].

*Material Flow Analysis (MFA)* [239] rabi se za analizu izravnih ili posrednih tjeкова materijala u sustavu definiranim granicom sustava. Iako *neto*-količina materijala nije nužno najpogodniji pokazatelj ukupnih utjecaja na okoliš, analiza posrednih ili neiskorištenih tjeкова materijala može upućivati na rizike za okoliš.

Analiza tjeкова energije i potrošnje energije razmatranog sustava provodi se za referentni granicom odijeljeni sustav ili ekonomiju, a radi identifikacije posrednih ili energetske nedjelotvornih tjeкова energije. Procjena energetske efikasnosti sustava temelji se na prvom zakonu termodinamike o neuništivosti energije i nepromjenjivosti količine *neto*-energije te pretvorbama energije iz jednog oblika u drugi [240]. Analizu energije i energetske djelotvornosti pretvorbi energije moguće je računati preko *eksergije* [241], [242] ili *emergije* [243]. Metodama kojima se računa eksergija ili emergija sustava uzimaju se u obzir kvaliteta i kvantiteta energijskih tjeкова (*neto*-količina, odnosno potrošnja energije) [244], [245], [246].

Eksergija sustava definirana je kao najveći mehanički rad koji sustav može proizvesti [241], [247]. Analiza eksergije sustava služi procjeni efektivnosti potrošnje resursa te daje pregled kritičnih mjesta na kojima postoje energetske gubici, a kako bi se omogućilo poboljšavanje energetske djelotvornosti sustava. Analiza eksergije sustava rabi se za analizu energetske djelotvornosti sustava, kao što su sustavi grijanja ili sustavi za proizvodnju električne energije [248], [249].

Odum [243] je razvio metodologiju za analizu energije sustava, gdje su resursi i materijalna dobra (njihovi tjekovi, pretvorbe i potrošnja) izraženi u jedinicama Sunčeve (solarne) energije i količini Sunčeve energije potrebne za njihovu proizvodnju [250]. Metode procjene eksergije i energije sustava podrazumijevaju analizu životnog ciklusa. Emergija se primjerice upotrebljuje za analizu energetske efikasnosti tehnoloških procesa proizvodnje [240], a eksergija za procjenu utjecaja proizvoda na okoliš [251], [252], [253].

Eksergija i energija mjerne su jedinice kojima je moguće izraziti termodinamičke značajke utjecaja na okoliš, a u literaturi postoji nekoliko slučajeva da su se pokušale primijeniti za procjenu utjecaja na okoliš tijekom razvoja proizvoda, npr. [252], [253], [254]. Kao i u slučaju procjene životnog ciklusa proizvoda (*LCA* metode) i ovdje postoje ograničenja u primjeni takvih metoda u ranim fazama konstruiranja i razvoja. Naime, za njihovu primjenu potrebno je imati podatke o životnome ciklusu proizvoda.

### **2.4. Rasprava o pregledu literature s područja istraživanja**

Kompleksnost zadataka, dostupnost i kvaliteta resursa za razvoj (npr. informacija o proizvodu, proizvodima konkurencije ili prijašnjim proizvodima iz portfelja poduzeća) utječu na proces razvoja. Plan, troškovi i kvaliteta proizvoda definiraju se na temelju procjene trajanja i vrste aktivnosti potrebnih za daljnji nastavak procesa konstruiranja, a pogotovo je važno znati trajanje aktivnosti poput izmjena, razrade i rekonstrukcije proizvoda [255]. Izmjena faza konstruiranja i uspješna provedba procesa konstruiranja podrazumijevaju da je donesena odluka o rješenju proizvoda koje je odabrano za daljnji razvoj i razradu te da su završeni i pozitivno vrednovani svi zadaci iz prethodnih faza procesa konstruiranja [256].

Pravodobna odluka o konceptu omogućuje da se pristupi konstrukcijskoj razradi i poštuje rok isporuke proizvoda [23]. O nekim komponentama, karakteristikama proizvoda i parametrima njegova životnog ciklusa mora se odlučiti i prije samog isplaniranog službenog vremena odluke, npr. u slučaju kratkih rokova isporuke, a duljeg vremena potrebnog za oblikovanje i razvoj [23]. Trajanje aktivnosti konstrukcijske razrade određuje se prema procijenjenom vremenu koje je potrebno za najkompleksnije zadatke, razradu sklopova i komponenata proizvoda s najviše zahtjeva ili u najkraćem roku isporuke.

Ekološku prihvatljivost proizvoda tijekom procesa njegova razvoja, prema trenutačnim saznanjima, moguće je procijeniti uz zadovoljavajuću točnost tek nakon odlučujućih ranih faza razvoja. U pravilu, tehničke je sustave potrebno vrednovati kvalitativno, kvantitativno i s obzirom na procijenjene troškove [72]. U ranim fazama konstruiranja i razvoja proizvoda,

vrednovanje ekološke prihvatljivosti najčešće je kvalitativno zbog toga što u ranim fazama razvoja uobičajeno nedostaju podatci potrebni za provođenje procjene životnog ciklusa proizvoda (*LCA*) [1]. Troškovi razvoja generirani u konceptualnoj fazi, manji su nego u kasnijim fazama procesa konstruiranja, ali odluke nakon završetka koncipiranja proizvoda imaju presudni utjecaj na izgled, funkcionalnost, kvalitetu i troškove. U konceptualnoj fazi teži se generiranju što više koncepata kako se ne bi previdjela najbolja rješenja, no isto tako je potrebno dovoljno rano procijeniti najnepovoljnija konceptijska rješenja kako se dragocjeno vrijeme i resursi ne bi trošili na razvoj ekološki neprihvatljivih koncepata.

U ranim fazama konstruiranja i razvoja proizvoda, kada se razmatra široki spektar različitih rješenja, postoji i veći potencijal za razvojem ekološki prihvatljivih rješenja, nego u poodmaklim fazama tijekom konstrukcijske razrade. Stoga se može zaključiti da su prednosti vrednovanja ekološke prihvatljivosti mnogo izraženije u ranim fazama konstruiranja i razvoja nego u onima kasnijim, barem što se tiče razmatranja konceptijskih rješenja i radnih principa proizvoda.

Nedostatak informacija o značajkama proizvoda koje su uobičajeno definirane tek tijekom konstrukcijske razrade utječe na to da je vrednovanje ekološke prihvatljivosti u konceptualnoj fazi uglavnom kvalitativno. U poodmaklim fazama procesa konstruiranja i razvoja proizvoda (tijekom konstrukcijske razrade i pripreme za proizvodnju) vrednovanje ekološke prihvatljivosti može biti temeljeno na kvantifikaciji utjecaja proizvoda na okoliš, koja se smatra pouzdanijim načinom vrednovanja ekološke prihvatljivosti proizvoda. No, potencijal za uvođenje ekološki prihvatljivih rješenja i alternativa u poodmaklim je fazama razvoja manji jer je otprilike do 70 % utjecaja na okoliš već predodređeno izborom konceptijskog rješenja proizvoda [30]. U kasnijim fazama konstruiranja značajne promjene na rješenju proizvoda u smislu promjena funkcija ili radnih principa proizvoda i ostale neplanirane izmjene na proizvodu, modelu proizvoda i ključnim značajkama, popraćene su dodatnim troškovima razvoja i neplaniranim produljenjem procesa razvoja proizvoda, što može rezultirati fatalnim posljedicama za poduzeće [257].

Odluke donesene u ranim fazama razvoja proizvoda znatno utječu na ekološku prihvatljivost proizvoda. Razvoj ekološki prihvatljivih proizvoda, u pravilu, uključuje razmatranje proizvoda u svim fazama njegova životnog ciklusa, a bitne karakteristike proizvoda pritom su značajke oblika i strukture proizvoda, sirovine, materijali i tehnološki postupci proizvodnje. Razmatranje transporta (materijala, komponenata i distribucija proizvoda), te značajki proizvoda koje determiniraju utjecaje na kraju životnog ciklusa

proizvoda zahtijevaju razmatranje logistike i upravljanja životnim ciklusom proizvoda. Iako je metodologija procjene životnog ciklusa proizvoda (*LCA*) najviše primijenjena upravo za potrebe razmatranja ekološke prihvatljivosti i održivosti proizvoda (jer je njome moguće objektivno i kvantitativno opisati utjecaje proizvoda na okoliš), procjena utjecaja na okoliš zbog životnog ciklusa proizvoda zahtjevna je za primjenu u svrhu odlučivanja tijekom konstruiranja i razvoja proizvoda, pogotovo za razvoj novih proizvoda.

Utjecaji proizvoda na okoliš u konačnici se provjeravaju s obzirom na funkcionalne i ostale zahtjeve u kasnijim fazama konstruiranja. Procjena životnog ciklusa (*LCA*) namijenjena je za provjeru ispunjava li proizvod zahtjeve ekološke prihvatljivosti [102] tijekom i nakon provedene rekonstrukcije proizvoda. Kvantitativne metode vrednovanja ekološke prihvatljivosti ipak je najbolje primjenjivati u fazi detaljiranja i konstrukcijske razrade proizvoda jer su tada zadovoljeni svi zahtjevi za podacima o proizvodu potrebni za provođenje metoda za procjenu utjecaja proizvoda na okoliš (ili se mogu aproksimirati sa zadovoljavajućom točnošću).

Promjene u rješenju proizvoda u fazi konstrukcijske razrade ograničene su što se tiče smanjivanja utjecaja na okoliš. U pravilu, znatnije promjene kao što je promjena koncepta u fazi konstrukcijske razrade nisu uobičajene. Promjene u fazi detaljiranja uglavnom se tiču redefiniranja oblika, strukture, detalja i također proizvodnih postupaka i izmjena materijala za izradu komponenata proizvoda. Definiranje životnog ciklusa proizvoda u konceptualnoj fazi zahtjeva donošenje pretpostavki o budućem životnom ciklusu proizvoda [258] te može produljiti proces konstruiranja primjerice zbog izbora ekološki prihvatljivih materijala. Kriteriji za izbor ekološki prihvatljivih materijala, odnosno vrednovanje ekološke prihvatljivosti materijala propisuju detaljno razmatranje potencijalno prihvatljivih svojstava materijala i obilježja proizvodnih postupaka, što otežava proces donošenja odluka [74].

Popisi poželjnih karakteristika proizvoda koji se rabe pri dodjeljivanju oznake ekološke prihvatljivosti proizvodima nisu dostatna potpora vrednovanju i odlučivanju tijekom konstruiranja i razvoja proizvoda jer se udovoljavanje tim zahtjevima ne može provjeriti bez provedbe dodatnih analiza utjecaja na okoliš [259]. Detalji o proizvodu i njegovu životnom ciklusu koji su nužni ulazni podatci za *LCA* metodu poznati su tek nakon konstrukcijske razrade, nakon čega se može zaključivati o značajkama ekološke prihvatljivosti proizvoda i posredno konceptijskoga rješenja proizvoda, koji su važni za utjecaje proizvoda na okoliš [260].



Pregledom postojećih istraživanja na temu metoda za vrednovanje ranih rješenja proizvoda ustanovljeno je da ne postoje formalne metode za vrednovanje na svakoj razini razrade konceptijskoga rješenja proizvoda te da se ocjenjivanje koncepata uglavnom provodi na temelju zahtjeva koji su u najvećem broju funkcionalni zahtjevi (određuju funkcionalnost proizvoda), te, s druge strane, ostalih zahtjeva koje postavljaju proizvođači, poduzeće ili korisnik proizvoda (koji proizlaze iz potreba korisnika). Bhander i drugi [3] definirali su generički model za konstruiranje ekološki prihvatljivih proizvoda koristeći se Andreasenov i Heinov prikaz razina razrade rješenja proizvoda [44].

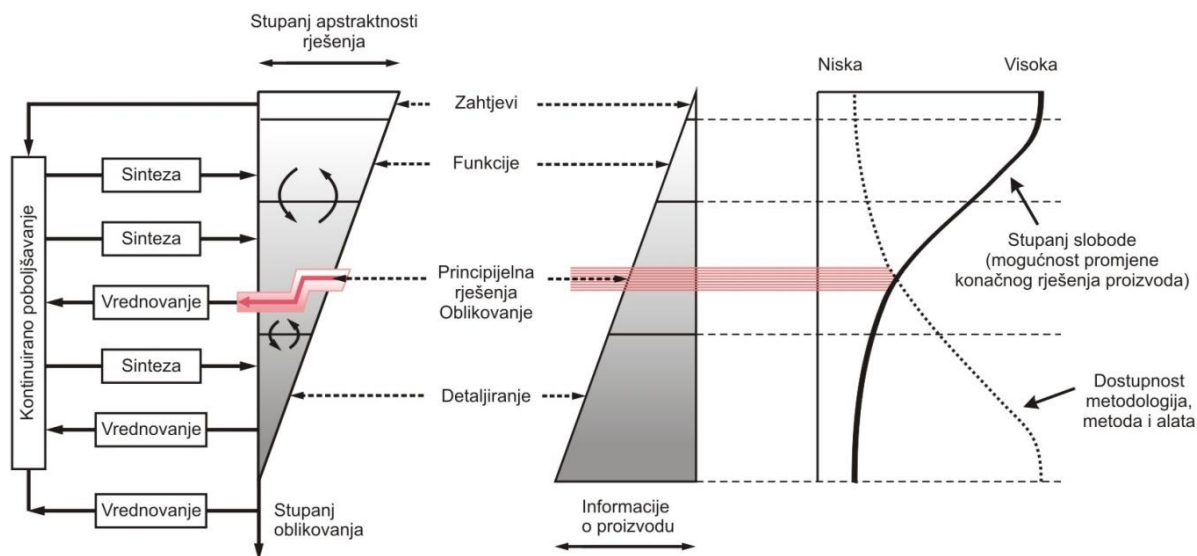
Koncepti proizvoda također su, uz funkcije, određeni fizičkim rješenjima nositelja funkcija (komponentama proizvoda) [111]. Modularno oblikovanje proizvoda, odnosno moduli proizvoda proizlaze iz definicije organa i strukturnog prikaza organa proizvoda. Prema tome, moduli proizvoda i konfiguracija proizvoda proizlaze iz strukture organa proizvoda i analogni su joj. Prema Sakao i Fagnoli [32], vrednovanje ekološke prihvatljivosti provodi se tek nakon odluke o strukturi proizvoda, no pritom ne definiraju koje su informacije o proizvodu nužne da bi se vrednovanje provelo.

Za *LCA* potrebno je imati *CAD* model proizvoda i listu materijala komponenata proizvoda, a u konceptualnoj fazi razvoj još nije došao do te točke [38]. U praksi se tada za usporedbu koristi sličan, već komercijalni proizvod za usporedbu. Provodi se daljnja razrada konceptijskoga rješenja te definiraju materijali i tehnološki postupci izrade. Prikupljanje podataka o proizvodu i njegovom životnom vijeku je zahtjevno zbog kompliciranosti *LCA* metode i nedostupnosti podataka o proizvodu koji je tek u fazi osmišljavanja i razvoja [18], [262], [263].

Collado-Ruiz i Ostad-Ahmad-Ghorabi [264] pokazali su da detaljne informacije o utjecajima na okoliš mogu konstruktorima otežati proces poboljšavanja rješenja. Konstruktori se u tom slučaju usredotočuju na smanjivanje utjecaja i rekonstrukciju proizvoda, a ne na razvoj novih, kreativnih i inovativnih rješenja. Ovaj je efekt poznat pod nazivom fiksacija ([265], [266]) i negativno utječe na sposobnost konstruktora da se usredotoče na razvoj novih koncepata.

Knight i Jenkins [138] smatraju da je glavna zamjerka metodama i alatima ekodizajna namijenjenima konceptualnoj fazi to što je za vrednovanje ekološke prihvatljivosti potrebno razmotriti više desetaka različitih aspekata proizvoda i njegovih značajki, a dati jedinstvenu konačnu ocjenu ekološke prihvatljivosti razmatranog koncepta. U literaturi se nedostaci metoda i alata ekodizajna objašnjavaju time što nisu usmjereni na pružanje potpore za

oblikovanje i konstruiranje, već planiranje strategija razvoja i retrospektivnu analizu postojećih proizvoda i rješenja [267]. Pri usporedbi koje su informacije o proizvodu potrebne za vrednovanje ekološke prihvatljivosti (slika 2.8.) i kakva je dostupnost tih informacija (slika 1.1., tablica 2.7.) donijeti su zaključci o nekonzistentnosti između tradicionalnog i ekodizajnerskog pristupa konstruiranju.



**Slika 2.8.** Stupanj razrade rješenja i informacije o ekološkoj prihvatljivosti tijekom konstruiranja i razvoja proizvoda [143]

**Tablica 2.7.** Generički zahtjevi za vrednovanje proizvoda prema modelu za konstruiranje ekološki prihvatljivih proizvoda [3]

Zahtjevi za informacijama za vrednovanje rješenja proizvoda i generiranje koncepata [3]	Razine razrade rješenja proizvoda [44]
zahtjevi korisnika, zahtjevi dionika	problem
funkcionalni zahtjevi	tehnički proces funkcije principi organi
struktura proizvoda (na temelju značajki modula i sklopova), materijali, oblici, značajke komponenata, ergonomski zahtjevi	struktura oblik materijali
geometrijske značajke, kvaliteta površina i tolerancije	dimenzije kvaliteta površina
zahtjevi za proizvodnju, isporuku, zahtjevi dobavljača	detalji

Ako se pretpostavi da koncepti i alternative proizvoda imaju jednaku formu i funkcije, utjecaji na okoliš tijekom eksploatacije svode se na male razlike u potrošnji energije zbog

razlika u masi, inerciji, toplinskoj vodljivosti itd. te istrošenosti dijelova proizvoda tijekom određenog razdoblja uporabe [62]. Važnost razlika bi u tom slučaju ovisila o specifičnom problemu i svrsi proizvoda, dok bi se utjecaji na okoliš u preostalim fazama životnog ciklusa (osim eksploatacije) mogli svesti na poopćene modele koji opisuju utjecaje na okoliš [206]. Za aproksimaciju utjecaja na okoliš novih, originalnih koncepata uobičajeno nedostaju odgovarajući referentni proizvodi za usporedbu [60], [102].

Procjena utjecaja na okoliš omogućena je tek nakon dodjeljivanja materijala komponenata i definiranja oblika komponenata, tj. proizvoda. *LCA* se uobičajeno provodi radi poboljšanja utjecaja poznatoga postojećeg proizvoda (rekonstrukciji) [233]. Najnovijim pristupima rješavanju problema implementacije *LCA*-a u ranim fazama razvoja proizvoda glavno je ograničenje nesigurnost pri definiranju oblikovanja proizvoda za koji se provodi *LCA* (oblika, komponenti i interakcije utjecaja komponenti, glavnih sklopova sustava itd.). Do koje se razine može jamčiti pouzdanost procjene utjecaja s obzirom na nepoznanice oko oblikovanja proizvoda, koje nužno moraju biti donesene za *LCA*, ostaje uglavnom nepoznanica.

Literatura bilježi nastojanja da se ograničenja provođenja *LCA*-a zaobiđu, pa su razvijene metodologije koje opisuju procedure za provedbu jednostavnijeg oblika *LCA* (engl. *Streamlined LCA – SLCA*) za dobivanje okvirnih rezultata *LCA* (engl. *screening*) [268]. Te metode ignoriraju utjecaje na okoliš uzrokovane pojedinim fazama životnog vijeka (zbog nedostupnosti podataka ili inicijalnih pretpostavki o manjoj važnosti tih utjecaja za proces razvoja proizvoda), zatim ignoriraju određene tjebove energije i materijala u analiziranom životnom ciklusu ili proizvodnji te utjecaje na okoliš ili kategorije utjecaja na okoliš.

Još jedno ograničenje koje se povezuje s provođenjem *LCA*-a u ranim fazama konstruiranja jest u tome što *LCA* nije orijentirana na razmatranje značajki proizvoda koje su u središtu razvojnog procesa, i tek su otkrivene i definirane tijekom tog procesa. Potrebne su dodatne metode kako bi se utjecaji na okoliš povezali sa funkcijama koje proizvod ostvaruje, što omogućuje procjenu ekološke prihvatljivosti koncepata proizvoda određenih značajkama oblika i forme (preliminarnih oblikovnih rješenja proizvoda) [52].

Dewulf [159] je pokazao kako *LCA* može služiti kao alat kojim se generiraju podatci o proizvodu koji su potrebni za druge, jednostavnije metode ekodizajna (npr. *LiDS-Wheel* metode [147] u radu Bernsteina i drugih [50]), no mora se temeljiti na analizi poznatoga proizvoda. U svakom slučaju, *LCA* nije prilagođena za razvoj potpuno novih proizvoda [262] te je za njenu provedbu potreban multidisciplinarni tim stručnjaka [98].

### 3. KVALITATIVNO VREDNOVANJE EKOLOŠKE PRIHVATLJIVOSTI

*Ovo poglavlje doktorskog rada donosi pregled kvalitativnih kriterija ekološke prihvatljivosti koje svoju primjenu mogu naći u konceptualnoj fazi procesa konstruiranja. Opisana je studija slučaja u kojoj su ispitanici rangirali konceptijska rješenja prema ekološkoj prihvatljivosti. Obrazložena je motivacija koja je istraživanje usmjerila prema razvoju kvalitativnih kriterija ekološke prihvatljivosti za konceptualnu fazu procesa konstruiranja.*

---

#### 3.1. Preliminarna analiza

Kvalitativni su kriteriji ekološke prihvatljivosti najčešće smjernice za oblikovanje [120] kao što su: a) što manja potrošnja materijala, b) što manja potrošnja energije, c) izbjegavati uporabu toksičnih i opasnih materijala i postupaka, d) što manja potrošnja resursa i što veća bio-kompatibilnost, e) optimizacija životnog ciklusa proizvoda i komponenata proizvoda, f) dulji životni vijek materijala i g) konstruiranje za rastavljaljivost.

Potencijalni problem kvalitativnog vrednovanja i usporedbe ekološke prihvatljivosti konceptijskih varijanti proizvoda jest u tome što vrednovanje može upućivati na to da su razmatrana rješenja prilično slična glede ekološke prihvatljivosti. Kod kvalitativnih pristupa vrednovanju i usporedbi ekološke prihvatljivosti lakše je ustanoviti razliku među rješenjima, no pri vrednovanju nedostaje kvantitativna dimenzija u odlučivanju koja bi upućivala na magnitudu tih razlika.

Problem provođenja isključivo kvalitativnih analiza ekološke prihvatljivosti pojavljuje se pri usporedbi utjecaja na okoliš u pojedinim fazama životnog ciklusa [121]. Nedostatak kvantitativne komponente kod kvalitativnih metoda procjene utjecaja na okoliš ograničavaju učinkovitost tih metoda [183]. Vrijedi i obrnuto, kvalitativne smjernice za vrednovanje ekološke prihvatljivosti nužne su i za kvantitativno vrednovanje ekološke prihvatljivosti. To možemo primijetiti primjerice pri usporedbi električnih proizvoda (proizvodi koji se koriste električnom energijom za rad) i proizvoda kod kojih nema potrošnje električne energije u fazi eksploatacije, ali ima u ostalim fazama životnog ciklusa.

Vrednovanje ekološke prihvatljivosti na temelju rezultata procjene životnog ciklusa zahtjevno je za konstruktore jer utjecaji na okoliš ovise o posljedicama specifičnih *stresora*, a ne izravno zbog potrošnje materijala, energije ili procesa koji do njih dovode. Primjerice, atmosferski utjecaj jednog kilograma ugljikova dioksida jednako se vrednuje bez obzira na to je li riječ o rezultatu procjene životnog ciklusa kućnoga rashladnog uređaja ili televizora [269]. Kako bi riješili ovaj problem, DeVierno i drugi [270] razvili su metodu kojom je moguće ustanoviti relaciju između značajki proizvoda i utjecaja na okoliš. Za provedbu metode potrebno je prethodno procijeniti utjecaje na okoliš proizvoda primjerice *LCA* metodom. Na primjeru mobitela zaključili su da volumen mobitela ima najvažniji utjecaj na magnitudu utjecaja na okoliš u fazi odlaganja.

Mnogim, u ovom istraživanju prikazanim kriterijima vrednovanja ekološke prihvatljivosti razmatraju se značajke proizvoda koje nisu dostupne u konceptualnoj fazi konstruiranja. Primjerice, informacije o proizvodu potrebne za kvalitativnu analizu metodom *Ecodesign PILOT* [140] jesu:

- ukupna masa proizvoda, uključujući pakiranje
- dimenzije proizvoda
- procjena životnog ciklusa komponenata i dijelova proizvoda
- maksimalni korisni životni vijek proizvoda i
- osnovne odlike funkcionalnosti proizvoda (kvalitativan, opisni prikaz funkcija i kvalitete zadovoljenja korisničkih potreba).

Zapaniotis i Dentsoras [97] zaključili su da vrednovanje koncepta na temelju njegovih značajki znači traženje veza između atributa (karakteristika) proizvoda i podataka o konceptu koji nisu nužno transparentni, jednoznačni ili očiti iz definicije samog koncepta. Stoga

vrednovanje konceptata nije proces osniva na znanstveno utemeljenim ili empirijski dokazivim činjenicama o konceptu, nego često ovisi o subjektivnom doživljaju i procjenama vrednovatelja. Znajući to, i uzimajući u obzir nedostatak podataka o proizvodu u ranim fazama konstruiranja i značajkama važnima za otkrivanje utjecaja proizvoda na okoliš, rizik je zbog izbora ekološki nepovoljnog koncepta velik.

U nastavku opisano istraživanje provedeno je radi propitivanja učinkovitosti metoda ekodizajna kojima se propisuju kvalitativni kriteriji ekološke prihvatljivosti, a služe vrednovanju i usporedbi ekološke prihvatljivosti konceptata proizvoda [63], [81].

## **3.2. Vrednovanje ekološke prihvatljivosti konceptata**

Vrednovanje ekološke prihvatljivosti konceptata provode konstruktori individualno ili u grupi, multidisciplinarni tim u kojem su konstruktori i stručnjaci ili vrednovanje provode stručnjaci koji istodobno ne sudjeluju u donošenju odluke o ekološki najprihvatljivijem konceptu [271]. S obzirom na ograničenja primjene metoda za kvantificiranje utjecaja na okoliš u konceptualnoj fazi konstruiranja i razvoja proizvoda, a radi analize metoda i alata ekodizajna za kvalitativno vrednovanje ekološke prihvatljivosti, provedena je analiza predloženih metoda vrednovanja odabranoga proizvoda [81]. Analizom slučaja ustanovljena su temeljna obilježja jediničnog sustava [79], na osnovi kojih su definirani ciljevi provedenog istraživanja.

S obzirom na relativno manji broj metoda i alata ekodizajna namijenjenih za ranije nego za kasnije faze konstruiranja i razvoja proizvoda, Dewulf [159] je predložio da se metode i alati koji su prvotno namijenjeni za poboljšavanje i unapređivanje ideja ili proizvoda prenamijene za konceptualnu fazu. Ako bi se razvile procedure koje omogućuju vrednovanje ekološke prihvatljivosti s pomoću kvalitativnih kriterija ekološke prihvatljivosti (propisanih primjerice ekodizajnerskim smjernicama za oblikovanje), omogućilo bi se semikvantitativno vrednovanje ekološke prihvatljivosti u konceptualnoj fazi [159]. Tako bi se kvalitativni kriteriji smjernica ekodizajna te kvalitativni i semikvantitativni kriteriji metoda i alata ekodizajna, mogli prenamijeniti i rabiti za vrednovanje ekološke prihvatljivosti. Nova metoda vrednovanja bila bi semikvantitativna.

Provedena je analiza smjernica te metoda i alata ekodizajna (tablica 3.1. i tablica 3.2.) radi odabira kriterija ekološke prihvatljivosti koji će biti ispitani studijom slučaja vrednovanja ekološke prihvatljivosti konceptata proizvoda. U provedenoj studiji slučaja propituje se

uporabljivost smjernica ekodizajna kao kvalitativnih kriterija vrednovanja ekološke prihvatljivosti u konceptualnoj fazi razvoja tehničkih sustava.

**Tablica 3.1.** Kvalitativni kriteriji ekološke prihvatljivosti: metode i alati s do 6 kriterija

Br.	Metode i alati s do 6 kriterija
1.	<i>Dominance Matrix</i> [168] Kriteriji: alatom nisu propisani kriteriji ekološke prihvatljivosti.
2.	<i>ERPA matrix</i> [20] Kriteriji: 1. izbor materijala, 2. potrošnja energije, 3. otpad (kruto stanje), 4. otpad (tekuće stanje), 5. otpad (plinovito stanje).
3.	<i>Philips Fast Five Awareness</i> [177] Kriteriji: 1. potrošnja energije, 2. reciklabilnost, 3. toksični i opasni otpad, 4. životni vijek, održavanje i visoka vrijednost proizvoda tijekom cijeloga životnog vijeka, 5. alternativni način na koji je ponuđena usluga uz proizvod.
4.	<i>Design for Environment guidelines</i> [170] Kriteriji: 1. održivost potrošnje resursa, 2. mali rizik po zdravlje ljudi i iskorištavanje prirodnih resursa, 3. minimalna upotreba resursa u proizvodnji i transportu, 4. efikasnost potrošnje resursa tijekom eksploatacije, 5. primjerena trajnost (životni vijek) proizvoda i njegovih komponenti, 6. proizvod konstruiran za lako rastavljanje, recikliranje i održavanje.
5.	<i>Eco-compass</i> [187] Kriteriji: 1. rizik za zdravlje ljudi i kvalitetu okoliša tijekom životnog ciklusa proizvoda, 2. očuvanje resursa (energije i materijala) tijekom životnog ciklusa, 3. potrošnja energije tijekom životnog ciklusa proizvoda, 4. potrošnja materijala tijekom životnog ciklusa proizvoda, 5. potencijal da se proizvod prenamijeni za dodatni (drugi) životni ciklus i recikliranje, 6. produljenje životnog vijeka potpomognuto uslugama povezanim s proizvodom.

*Dominance Matrix* [168], *Econcept Spiderweb* [168], *Eco-products tool* [178] i *Philips Fast Five Awareness* [177] specifično su namijenjeni usporedbi koncepata proizvoda. *LiDS-Wheel* [147] i *Eco-compass* [187] nisu namijenjeni vrednovanju koncepata proizvoda te ih je uputno rabiti za kvalitativno vrednovanje ekološke prihvatljivosti proizvoda na temelju rezultata procjene životnog ciklusa [50], [272], [273]. U literaturi se liste kriterija ekološke prihvatljivosti opisuju kao alati koji bi se potencijalno mogli iskoristiti za vrednovanje ekološke prihvatljivosti koncepata. Kako su kriteriji ekološke prihvatljivosti općeniti, generički ili propisuju karakteristike koje se tiču životnog ciklusa proizvoda [100], liste kriterija ekološke prihvatljivosti izdvojene su u uži izbor metoda ekodizajna koje bi bile prikladne pri vrednovanju ekološke prihvatljivosti koncepata proizvoda.

**Tablica 3.2.** Kvalitativni kriteriji ekološke prihvatljivosti: metode i alati s više od 6 kriterija

Br.	Metode i alati s više od 6 kriterija
1.	<p><i>LiDS-Wheel</i> [147]</p> <p>Kriteriji: 1. razvoj novog koncepta proizvoda, 2. udio materijala s niskim utjecajima na okoliš, 3. potrošnja materijala, 4. ekološka prihvatljivost tehnoloških postupaka proizvodnje i potencijal za smanjivanje utjecaja u fazi proizvodnje, 5. optimizacija distribucije proizvoda, 6. Smanjena potrošnja tijekom eksploatacije, 7. optimizacija faze proizvodnje i nabave sirovina, 8. optimizacija završne faze životnog vijeka.</p>
2.	<p><i>Econcept Spiderweb</i> [3], [168]</p> <p>Kriteriji: 1. efikasnost potrošnje resursa (materijala i energije), 2. kvaliteta zadovoljenja korisničkih potreba, 3. održivost korištenja obnovljivim resursima, 4. izbjegavanje opasnog i toksičnog otpada i emisija, 5. Reciklabilnost, 6. učinkovitost s obzirom na troškove, 7. izgled proizvoda, 8. dulji životni vijek.</p>
3.	<p><i>Eco-products tool</i> [178]</p> <p>Kriteriji: 1. smanjena potrošnja resursa, 2. dulji životni vijek proizvoda, 3. recikliranje resursa, 4. rastavljaljivost, 5. jednostavna proizvodnja, 6. proizvod siguran za okoliš i ljude glede emisija i toksičnosti, 7. energetska učinkovitost, mala potrošnja energije, 8. transparentnost informacija o potrošnji resursa i energije.</p>
4.	<p><i>Ten Golden Rules</i> [121]</p> <p>Kriteriji: 1. izbjegavati uporabu toksičnih materijala te ako nije moguće izbjeći, projektirati primjereni životni ciklus sa zatvorenim ciklusom kruženja toksičnih materijala, 2. minimizirati potrošnju energije i resursa u fazi proizvodnje i u fazi transporta, 3. implementirati značajke strukture proizvoda i kvalitetne materijale radi minimiziranja mase proizvoda, 4. minimizirati potrošnju energije i resursa u fazi eksploatacije, posebno za proizvode s najvećim utjecajima na okoliš u fazi eksploatacije, 5. maksimirati potencijal proizvoda za dulji životni vijek planiranjem servisa i unapređivanja proizvoda, 6. razvoj proizvoda s dugim životnim vijekom i većim utjecajima na okoliš u fazama, osim faze eksploatacije, 7. birati ekološki prihvatljivije materijale, površinsku zaštitu i lako rastavljiva rješenja u strukturi proizvoda u svrhu zaštite proizvoda od trošenja, nečistoća iz okoline i korozije te radi uštede troškova održavanja proizvoda i duljega životnog vijeka proizvoda, 8. planirati servisiranje, nadogradnju i recikliranje proizvoda razvojem lako rastavljivih proizvoda, označivanjem komponenata i materijala proizvoda, modularizacijom i uputama za korištenje proizvodom, 9. planirati nadogradnju, servisiranje i recikliranje minimiziranjem različitih materijala proizvoda, izborom materijala koji se mogu reciklirati te materijala s malim utjecajima na okoliš, 10. izbjegavati uporabu nerastavljivih spojeva na proizvodu.</p>
5.	<p><i>Eco-Design Value guidelines</i> [82]: tablica 3.3.</p>

*Dominance Matrix* [168], *Econcept Spiderweb* [168], *Eco-products tool* [178] i *Philips Fast Five Awareness* [177] specifično su namijenjeni usporedbi koncepta proizvoda. *LiDS-Wheel* [147] i *Eco-compass* [187] nisu namijenjeni vrednovanju koncepta proizvoda te je uputno rabiti ih za kvalitativno vrednovanje ekološke prihvatljivosti proizvoda na temelju rezultata procjene životnog ciklusa [50], [272], [273]. U literaturi se liste kriterija ekološke prihvatljivosti opisuju kao alati koji bi se potencijalno mogli iskoristiti za vrednovanje ekološke prihvatljivosti koncepta. Kako su kriteriji ekološke prihvatljivosti općeniti, generički ili propisuju karakteristike koje se tiču životnog ciklusa proizvoda [100], liste kriterija ekološke prihvatljivosti izdvojene su u uži izbor metoda ekodizajna koje bi bile prikladne pri vrednovanju ekološke prihvatljivosti koncepta proizvoda.



Voss i drugi [17] objašnjavaju da se tijekom konstruiranja i razvoja proizvoda odlučivanje o tome koje ekodizajnerske smjernice primijeniti prije svega temelji na razmatranju rezultata analize životnog ciklusa i utjecaja na okoliš referentnog proizvoda ili više njih. Odabir strategije ekodizajna u razvoju proizvoda također se provodi na temelju takvih razmatranja, analiza i *LCA* procjena [32], [274].

Bernstein i drugi [50] pokazali su da su metode i alati poput *LiDS-Wheel* [147] učinkovitiji ako se primjenjuju u kombinaciji s rezultatima prethodno provedene procjene životnog ciklusa alternativa koje se razmatraju i vrednuju. Razlog zašto je tomu tako, može biti u vrsti kriterija ekološke prihvatljivosti propisanih metodom ili alatom.

Vrednovanje prema kriterijima ekološke prihvatljivosti koje propisuju *Ten Golden Rules* [121], *LiDS-Wheel* [147], *Econcept Spiderweb* [168], *Philips Fast Five Awareness* [177], *Eco-products tool* [178] i *Eco-compass* [187] impliciraju razmatranje životnog ciklusa proizvoda, tj. koncepta proizvoda i kvantifikaciju utjecaja proizvoda na okoliš. Broj kriterija ekološke prihvatljivosti propisanih tim metodama kreće se između 5 i 10, te su ujedno i preopćeniti kako bi se na temelju njih donijela ukupna ocjena ekološke prihvatljivosti razmatranih konceptijskih rješenja proizvoda. Nadalje, kriterij ekoefikasnosti (koji je propisan većinom analiziranih metoda i alata – tablica 3.1. i tablica 3.2.) ne može se primijeniti kao kvalitativni kriterij vrednovanja ekološke prihvatljivosti u konceptualnoj fazi stoga što značajke proizvoda koje su ključne za procjenu troškova i utjecaja na okoliš nisu definirane prije završetka konstrukcijske razrade proizvoda.

Smjernice *Design for Environment* [170] smjernice su ekodizajna, odnosno smjernice za ekološki prihvatljivo oblikovanje. Iako je alatom propisan kudikamo najveći broj smjernica, one služe za razmatranje isključivo oblika i forme proizvoda, te time nedovoljno pružaju potporu vrednovanju ekološke prihvatljivosti konceptijskih rješenja proizvoda.

Matrica *ERPA* [20] također je isključena iz užeg izbora kao metoda koja bi se mogla primijeniti za vrednovanje ekološke prihvatljivosti koncepta proizvoda. Kriteriji propisani metodom *ERPA* [20] zahtijevaju razmatranje ekološke prihvatljivosti koncepta u svakoj od faza životnog ciklusa proizvoda, a za takvu kvantifikaciju u konceptualnoj fazi uobičajeno nema dostupnih podataka.

#### 3.2.1. Smjernice *Eco-Design Value* [82] i istraživačka pitanja studije

Smjernice ekodizajna i *LCA* studije referentnih proizvoda smatraju se prikladnim metodama za potporu razvoju ekološki prihvatljivih proizvoda u konceptualnoj fazi razvoja

[275]. To je stoga što smjernice posredno upućuju na kriterije ekološke prihvatljivosti te pružaju generičke upute za razvoj ekološki prihvatljivih proizvoda, a *LCA* studije upućuju na parametre životnog ciklusa proizvoda koji formiraju sliku utjecaja na okoliš referentnih proizvoda.

Smjernice ekodizajna najčešće dolaze u obliku pravila ili poopćenih izjava o ekodizajnerskim strategijama, principima i rješenjima koje je uputno implementirati u proces konstruiranja i razvoja proizvoda. Smjernice *Eco-Design Value* [82] odabrane su za studiju vrednovanja ekološke prihvatljivosti konceptata u kojoj je sudjelovalo 11 magistara inženjera strojarstva.

**Tablica 3.3.** Kriteriji ekološke prihvatljivosti propisani smjernicama *Eco-Design Value* [82]

Smjernice	Grupe kriterija ekološke prihvatljivosti	Broj kriterija u grupi kriterija
<b>Što manji utjecaji na prirodu i okoliš</b>	Koncept je 'čist i siguran'	4
	Konceptom se podržava obnavljanje prirodnih resursa nakon upotrebe i eksploatacije	3
	Koncept podržava čistoću zraka (ne utječe na promjenu sastava zraka)	3
	Koncept oponaša rješenja iz prirode	3
<b>Što manja potrošnja resursa</b>	Konceptom se podržava smanjivanje ili ujednačivanje potrošnje resursa	3
	Konceptom se podržavaju optimizacija i efikasnost potrošnje resursa	3
	Konceptom se podiže svijest o ekološkim aspektima upotrebe proizvoda	2
	Konceptom se podržava zajedničko korištenje proizvodom više korisnika	3
<b>Dulji životni vijek i faza eksploatacije proizvoda</b>	Proizvod je konstruiran za dulji životni vijek i veću pouzdanost pri radu	3
	Mogućnost popravaka i veća obnovljivost proizvoda za dulji životni vijek	3
	Koncept podržava ideju privrženosti korisnika proizvodu	4
	Konceptom se implementiraju poznata (tradicionalna) rješenja, a koja su još uvijek dobra	4
<b>Dulji korisni životni vijek proizvoda i njegovih komponenata</b>	Koncept podržava rastavljivost i reciklabilnost proizvoda	4
	Koncept podržava multifunkcionalnost proizvoda	3
	Korisnik može prilagoditi proizvod svojim potrebama tijekom faze eksploatacije proizvoda	2
	Konceptom se podržava ideja univerzalnosti implementiranih rješenja	3

Smjernice *Eco-Design Value* [82] propisuju 50 smjernica za oblikovanje i razvoj ekološki prihvatljivih proizvoda. Namjena im je da konstruktore upoznaju s načinima oblikovanja i strategijama ekodizajna. Smjernice su podijeljene u četiri grupe smjernica kojima se na opisan (kvalitativni) način propisuju kriteriji ekološke prihvatljivosti (tablica 3.3.).

Istraživačka pitanja studije slučaja:

1. Kakva je učinkovitost primjene kvalitativnih kriterija ekološke prihvatljivosti propisanih smjernicama *Eco-Design Value* [82] u usporedbi s vrednovanjem ekološke prihvatljivosti koncepata pri kojemu kriteriji ekološke prihvatljivosti nisu eksplicitno određeni?
2. Koji faktori mogu utjecati na ishod kvalitativnoga vrednovanja koncepata proizvoda u uvjetima propisanim nacrtom studije slučaja?

### 3.2.2. Sudionici studije slučaja

U studiji slučaja sudjelovalo je jedanaest (11) magistara inženjera strojarstva. Tablica 3.4. prikazuje kvalifikacije sudionika studije. Odabir ispitanika nije slučajna, nego su birani sudionici studije s ne više od 6 godina iskustva rada u struci (tablica 3.5.), a obrazovanje su stekli u istoj instituciji – Fakultetu strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu.

**Tablica 3.4.** Profesionalne kvalifikacije sudionika studije

Odjel u poduzeću ili industrijski sektor	Broj sudionika
Razvoj proizvoda (oblikovanje, detaljiranje ili komercijalizacija proizvoda)	4
Istraživanje, znanost, suradnja s industrijskim partnerima ili obrazovnim institucijama	3
Projektni menadžment	2
Razvoj proizvoda i proizvodno inženjerstvo	1
Proizvodnja i distribucija energije	1

**Tablica 3.5.** Iskustvo sudionika studije

Godine od stjecanja titule magistra inženjera strojarstva	Broj sudionika
1 - 4 godina	2
4 - 6 godina	8
6 godina	1

Prema istraživanjima o razlikama između početnika i stručnjaka magistara inženjera [276], postoje pokazatelji da su inženjeri početnici vični rješavanju problema tako da analitički pristupaju razmatranju problema, dok iskusniji inženjeri nastoje preformulirati problem te dati rješenje problema na pragmatičan način. Upravo zbog toga što se studijom slučaja nastojalo motivirati sudionike da analitički pristupe problemu vrednovanja ekološke prihvatljivosti predloženih im koncepata, za studiju slučaja odabrani su magistri inženjeri strojarstva s ne više od oko 6 godina iskustva rada u struci. Pochat i drugi [161] navode da su metode i alati u obliku smjernica namijenjeni inženjerima početnicima.

#### 3.2.3. Koncepti procesa pranja rublja

Faza eksploatacije proizvoda i definiranje utjecaja na okoliš povezanih s korisnom fazom životnog vijeka za određene proizvode najveći je uzrok utjecaja na okoliš [206]. Te alternative moraju biti posebno razmatrane u ranim fazama konstruiranja jer su te faze i najfleksibilnije za provedbu izmjena s obzirom na male troškove izvođenja promjena u tim fazama. Problem povezivanja funkcija proizvoda i komponenata proizvoda s procjenom utjecaja na okoliš zbog eksploatacije proizvoda predmet je brojnih istraživanja [35], [52]. Postojeći se pristupi odlikuju ograničavajućom točnošću s kojom se utjecaji na okoliš mogu izračunati. Puglieri i drugi [49] uočili su nedostatke *QFD* metoda za vrednovanje upravo faze eksploatacije proizvoda, koja je posebno važna za proizvode s najkritičnijim utjecajima na okoliš u toj fazi [48].

U studiji slučaja bilo je potrebno izabrati konceptijska rješenja za usporedbu ekološke prihvatljivosti. Odabrana su konceptijska rješenja za ostvarivanje pranja i čišćenja tekstila. Na temelju svojstvenih funkcionalnih obilježja i tehnologija kojima je ostvarena glavna funkcija pranja ili čišćenja tekstila, koncepti se razlikuju u radnim principima i tehničkim rješenjima, što ih čini pogodnim kandidatima za studiju slučaja vrednovanja ekološke prihvatljivosti u konceptualnoj fazi razvoja tehničkih sustava (tablica 3.6.).

Pregledom literature izdvojeno je nekoliko kandidata konceptijskih rješenja koja će biti predmet vrednovanja ekološke prihvatljivosti u studiji. Pronađena se rješenja razlikuju po stupnju inovativnosti, dakle je li riječ o idejama i parcijalnim tehničkim rješenjima (koja se mogu pronaći u patentima) ili o u detalje razrađenim rješenjima čija je komercijalna vrijednost potvrđena na tržištu. U studiji slučaja sudionicima će biti predloženi koncepti A, B, C, D i E (tablica 3.6.). Koncepti F i G neće biti uključeni u studiju slučaja jer je riječ o

idejama proizvoda kod kojih nije s dovoljnom pouzdanošću ispitana efektivnost predloženih rješenja.

**Tablica 3.6.** *Primjeri konceptijskih rješenja pranja rublja [73]*

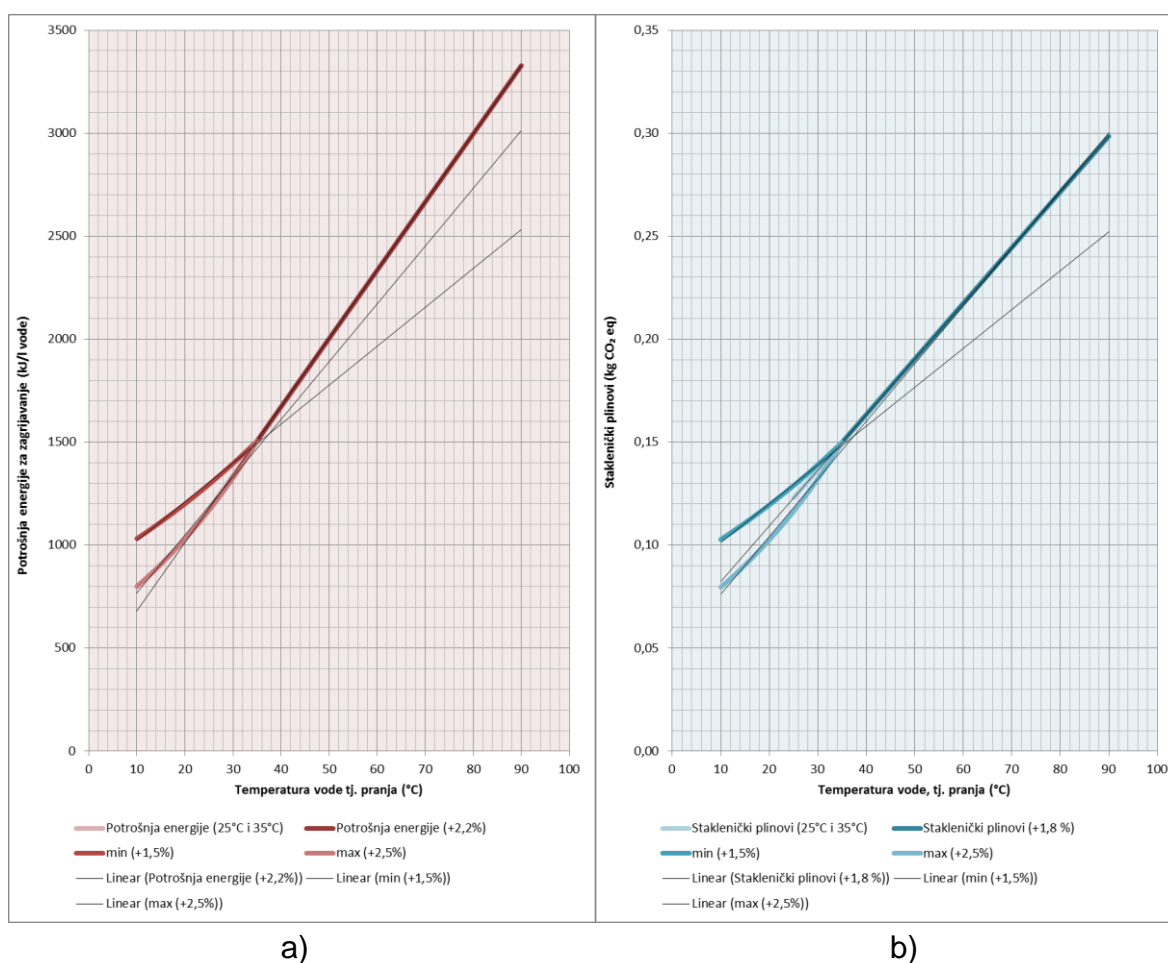
Radni princip	Materijali i energija	Sekundarni efekti na okoliš	Glavni fizikalni efekt ili fizikalni zakon
<b>A – Pranje rublja deterdžentom i toplom vodom</b>	voda, deterdžent, zagrijavanje vode, mehaničko djelovanje na rublje	siva topla voda s otopljenim nečistoćama i deterdžentom	kemijsko i mehaničko odstranjivanje nečistoća (mješavinom deterdženta i vode te toplom vodom)
<b>B – Pranje rublja pjenom vode i deterdženta</b>	voda, deterdžent, zrak, zagrijavanje vode, mehaničko djelovanje na rublje	siva voda s otopljenim nečistoćama i deterdžentom	kemijsko i mehaničko odstranjivanje nečistoća (pjenom vode i deterdženta te vodom)
<b>C – Pranje rublja ultrazvukom</b>	voda, ultrazvučni valovi	siva voda s odstranjenim (otopljenim) nečistoćama	efekt kavitacije
<b>D – Pranje rublja ukapljenim ugljikovim dioksidom, (suhi led)</b>	ugljkov dioksid u ukapljenom ili krutom stanju, zrak ili dušik	ugljkov dioksid (plinovito stanje), nečistoće, zrak ili dušik	krioliza (smrzavanje i zatim naglo izjednačivanje temperature nečistoća i rublja s okolišnom)
<b>E – Pranje rublja polimernim kuglicama</b>	voda, polimerne kuglice, deterdžent, mehaničko djelovanje na rublje	siva voda, polimerne kuglice, nečistoće, deterdžent	mehaničko djelovanje na rublje polimernim kuglicama
<b>F – Pranje rublja vodenom parom</b>	vodena para, mehaničko djelovanje na rublje	siva voda s otopljenim nečistoćama i deterdžentom	omekšavanje rublja i nečistoća vodenom parom
<b>G – Pranje rublja ioniziranim česticama</b>	voda ionizirane čestice (čestice srebra, vodika i dr.)	siva voda s otopljenim nečistoćama, ionizirane čestice	ionizacijsko privlačenje (negativno nabijene čestice srebra ili vodika iz vode)

Analizom arhetipskog koncepta automatske perilice rublja za kućanstva, utvrđeni su parametri procesa pranja koji utječu na ekološku prihvatljivost. U LCA analizama perilica rublja koje se mogu pronaći u literaturi, većina svih utjecaja na okoliš zbog životnog ciklusa pojavljuje se u fazi eksploatacije [277], [278]. Rüdener i drugi [279] izračunali su da udio utjecaja na okoliš u fazi eksploatacije čini oko 65 % ukupnih utjecaja na okoliš perilice rublja.

U istraživanju Koerner i drugih [280] potrošnja električne energije u fazi eksploatacije iznosi 61 % potrošnje energije tijekom životnog vijeka automatske perilice rublja, potrošnja vode čini čak 91 %, a emisije stakleničkih plinova 71 % ukupnih emisija stakleničkih plinova tijekom životnog ciklusa proizvoda. Koncept A je konceptijsko rješenje pranja rublja

deterdžentom i toplom vodom te je riječ o konceptu proizvoda čija je komercijalna vrijednost potvrđena prisutnošću proizvoda na europskome tržištu.

Potrošnja električne energije i staklenički plinovi razmjerno rastu povećanjem temperature pranja (slika 3.1.). Riječ je o linearnom rastu, a za izračun potrošnje energije i stakleničkih plinova u području temperatura između 10 i 35 °C uporabljeni su podatci iz literature [280] na temelju kojih su aproksimirani pravci i dobivene vrijednosti za navedene temperature.



**Slika 3.1.** a) Potrošnja energije automatske perilice rublja za različite temperature pranja;  
b) Utjecaj temperature pranja na emisije stakleničkih plinova [280]

Tehnička izvedivost i komercijalna vrijednost proizvoda koji se temelji na konceptu A potvrđeni su prisutnošću automatskih perilica za pranje rublja u kućanstvima na europskom tržištu dulje od 50 godina. Brojna poboljšanja ekološke prihvatljivosti ovoga proizvoda ostvaruju se periodično, od poboljšanja energetske efikasnosti do poboljšanja rekonstrukcijom

proizvoda [281]. Optimizacija potrošnje električne energije, vode i deterdženta postignuta je razvojem standardiziranih programa pranja.

Konceptom A proces odstranjivanja nečistoća s tekstilnih vlakana ostvaruje se zagrijanom vodom, deterdžentom i mehaničkim djelovanjem na rublje (centripetalna sila) [282]. Učinkovitost djelovanja deterdženta ostvaruje se namakanjem rublja u zagrijanoj vodi, čime se postiže opuštanje tekstilnih vlakana [283]. Voda kojom se obavlja namakanje rublja može biti zagrijana na niže (30 ili 40 °C) ili više (60 ili 90 °C) temperature pranja, već ovisno o odabranom programu pranja.

Namakanjem rublja u mješavini vode i deterdženta oslobađa se kemijska energija deterdženta koja sudjeluje u procesu pranja, a rotacijom bubnja u kojem je pohranjeno rublje ostvaruje se mehaničko djelovanje na rublje i trenje između vlakana, rublja i bubnja [277]. Za ispiranje se uzima nova količina čiste vode, a siva se voda ispušta u kanalizacijski odvod. Za koncepte A i B karakteristična je centrifuga kojom se omogućuje odvajanje vode za ispiranje rublja u završnom koraku procesa pranja.



**Slika 3.2.** Koncept B – Eco Bubble™ pranje tekstila pjenom deterdženta i vode [284]

Konceptom B pranje deterdžentom i toplom vodom ostvaruje se tako da se rublje natopi pjenom vode i deterdženta prije ispiranja vodom zagrijanom na 30 °C (slika 3.2.).

Mehaničko djelovanje na rublje nakon natapanja pjenom ostvaruje se također u bubnju kao kod koncepta A, uz ispiranje vodom i potom centrifugu, čime se ostvaruje cijedenje, odnosno završno odvajanje vode za ispiranje i rublja. Ovakav način pranja implementiran je u Samsungovoj perilici rublja Eco Bubble™ [284] koja je dostupna na tržištu. Prema tvrdnjama proizvođača, učinkovitost pranja ostvarena konceptom B usporediva je sa standardnim

procesima pranja. Pranje pjenom zahtijeva manje mehaničkoga djelovanja na rublje te se pranjem na nižim temperaturama ostvaruju uštede u potrošnji električne energije i do 55 %.

Koncept C implementacija je rješenja pri kojemu se odstranjivanje nečistoća s tekstila ostvaruje zbog djelovanja efekta kavitacije. Efekt je ostvaren zbog djelovanja ultrazvučnih valova u vodi.

Djelovanjem ultrazvučnih valova u tekućem mediju proizvode se mjehurići zraka u mediju (vodi ili mješavini tekućeg deterdženta i vode). Zbog rasta tlaka u mjehurićima oni agresivno pucaju te u dodiru s tekstilom ostvaruju odstranjivanje nečistoća s njega. Vođenje tekstila omogućeno je preko sustava kolotura (slika 3.3.a). Metoda pranja tekstila ultrazvukom i sustav za pranje tekstila patentirani su, a tehnička je izvedivost potvrđena prototipom i ispitivanjem učinkovitosti pranja tekstila [285].



**Slika 3.3.** a) Sustav za ultrazvučno pranje tekstila [285]; b) Electrolux Ultra Clean perilica rublja s olovkom za uklanjanje manjih mrlja ultrazvukom [286]

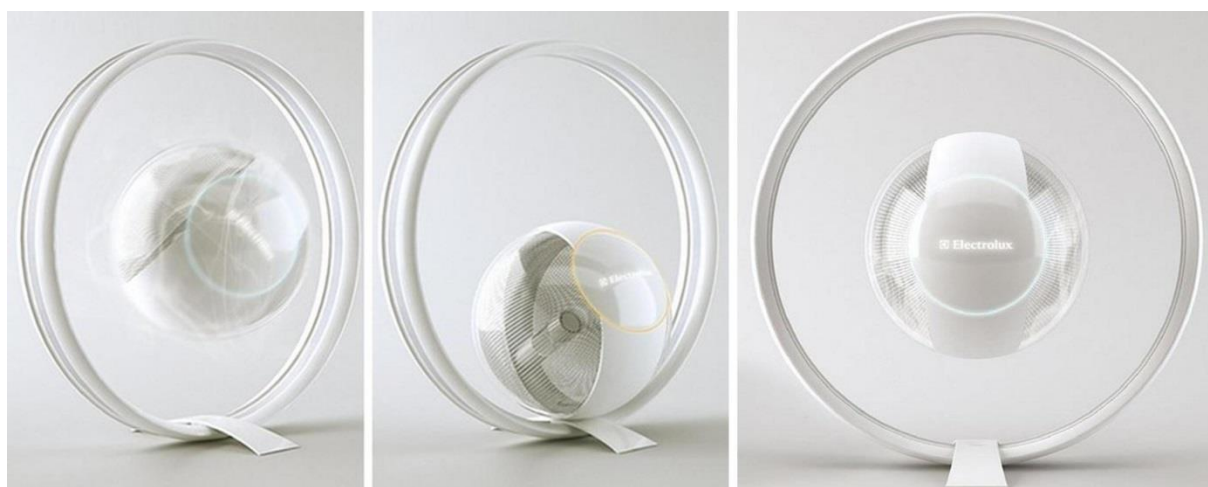
Ultrazvučni valovi trebaju biti usmjereni okomito na površinu tekstila kako bi se ostvario efekt kavitacije. Efikasnost pranja potpomognuta je djelovanjem tekućeg deterdženta i vibracija horizontalne ploče. Ploča ima trostruku ulogu u procesu pranja. Funkcije su ploče dovođenje tekućeg deterdženta i vode, odvođenje medija za pranje i nečistoća nakon njihova otklanjanja s tekstila te prijenos vibracija na tekstil. Maksimiranjem područja djelovanja ultrazvučnih valova pospješuje se agresivno pucanje mjehurića zraka [285].

Konceptom D opisano je konceptijsko rješenje čišćenja rublja, pri čemu se nečistoće odstranjuju suhim ledom (ugljikovim dioksidom). Koncept pod nazivom ‘Orbit’ osmislio je Elie Ahovi (slika 3.4.) te je rješenje prijavio na natjecanje *Electrolux Design Lab* koje jednom godišnje organizira Electrolux. Dizajner je osmislio proces pranja kojim se čišćenje rublja



ostvaruje usmjerenom strujom ugljikova dioksida na rublje, i to u bubnju karakterističnog oblika kugle [287].

Elie Ahovi opisuje da se mehaničko djelovanje na rublje kod 'Orbit' koncepta ostvaruje okretanjem bubnja zbog djelovanja snažnoga magnetskog polja [289]. Energija potrebna za napajanje ovog proizvoda znatno bi premašivala nominalnu potrošnju za slične proizvode, pa stoga komercijalizacija ovog koncepta nije ostvarena. Kako zbog ove, za ekološku prihvatljivost izrazito negativne funkcionalnosti, koncept 'Orbit' ne bi u početku bio okarakteriziran kao ekološki najnepovoljniji, ispitanicima u studiji slučaja predstavljen je koncept D.



*Slika 3.4. Koncept D - 'Orbit' koncept pranja tekstila suhim ledom [287]; slike dostupne na [288], [289]*

Konceptom D definirano je rješenje procesa čišćenja rublja suhim ledom te karakteristike oblika koncepta 'Orbit'. Ispitanici su informirani da obilježja koja upućuju na tehničku izvedivost izvornog koncepta 'Orbit' ne moraju biti eliminacijski faktor pri odlučivanju o ekološkoj prihvatljivosti koncepta D. Naime, tehničko rješenje kojim se ostvaruje mehaničko djelovanje na rublje) može biti osmišljeno po uzoru na koncepte A i B (ostvarenjem centripetalnoga djelovanja bubnja uređaja).

Kod koncepta E, za razliku od koncepata A i B, pranje i čišćenje rublja obavljaju se s pomoću polimernih kuglica koje zamjenjuju ulogu vode u procesu pranja. Voda je u tom procesu sredstvo kojim se potpomaže ostvarivanje trenja između polimernih kuglica i tekstilnih vlakana. Potrošnja vode nekoliko je puta manja nego kod koncepata A i B te se pranje rublja može obavljati na nižim temperaturama i uz manju potrošnju deterdženta za jednako učinkovito pranje. Zbog smanjene potrošnje deterdženta ukupna potrošnja vode za

ispiranje također je manja nego kod koncepata A i B. Spomenuti je koncept razvilo i patentiralo poduzeće Xeros Ltd [290].

Komercijalna vrijednost koncepta pranja polimernim kuglicama potvrđena je na američkom tržištu. Ispitanicima u studiji slučaja predloženi su neki od parametara procesa pranja. Pretpostavljeno je da je jedna šalica vode dostatna za cijeli ciklus pranja, a 20 kilograma polimernih kuglica dovoljno je za 100 ciklusa pranja, nakon čega ih je potrebno zamijeniti novima, i to zbog trošenja i smanjene efektivnosti pranja.



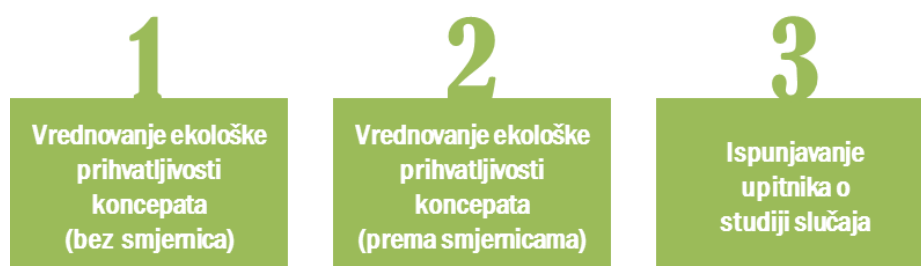
*Slika 3.5. Koncept E - pranje tektila polimernim kuglicama [290]*

#### 3.2.4. Nacrt i izvođenje studije slučaja

Studija slučaja osmišljena je i provedena radi ispitivanja učinkovitosti i primjenjivosti smjernica ekodizajna za oblikovanje ekološki prihvatljivih proizvoda (*Eco-Design Value* [82]) za potrebe vrednovanja ekološke prihvatljivosti konceptijskih rješenja proizvoda. Svrha je studije bila usporediti rangiranje koncepata proizvoda prema ekološkoj prihvatljivosti prije i nakon uvođenja kvalitativnih kriterija vrednovanja ekološke prihvatljivosti koje su proveli magistri inženjeri strojarstva u uvjetima individualnoga vrednovanja i ocjenjivanja ekološke prihvatljivosti. U studiji je sudjelovalo jedanaest ispitanika. U prvom koraku studije ispitanicima nisu bili ponuđeni kriteriji ekološke prihvatljivosti prema kojima bi proveli vrednovanje te su bili upućeni rangirati koncepte proizvoda na temelju vlastitog razmatranja ekološke prihvatljivosti pojedinih koncepata. U drugome krugu studije sudionici su bili upućeni na to da provedu novo rangiranje istih pet koncepata, no ovaj put koristeći se smjericama *Eco-Design Value* [82].

Prema nacrtu studije slučaja, zadatci za sudionike podijeljeni su u tri faze (slika 3.6.). U prvoj fazi studije sudionici su imali za zadatak vrednovati ekološku prihvatljivosti prezentiranih im koncepata proizvoda tako da rangiraju pet koncepata proizvoda od ekološki

najprihvatljivijeg prema ekološki najmanje prihvatljivom konceptu. Rangiranje su trebali provesti na temelju vlastitih zaključaka o ekološkoj prihvatljivosti koncepata.



**Slika 3.6.** Tri faze studije slučaja

**Tablica 3.7.** Podatci o konceptima pranja rublja A, B, C, D i E u studiji slučaja vrednovanja ekološke prihvatljivosti koncepata proizvoda [81]

Podatci o konceptima prezentiranim sudionicima studije	A	B	C	D	E
Opis funkcija i funkcionalnosti proizvoda, tekstualno	■	■	■	■	■
Funkcije, grafički prikaz / skica	□	□	□	□	□
Opis radnih principa proizvoda, tekstualno	■	■	■	■	■
Radni principi, grafički prikaz / skica	□	■	■	□	■
Oblikovanje i konstrukcijska razrada, tekstualno	■	□	□	□	□
Oblikovanje i konstrukcijska razrada, grafički prikaz / skica	□	■	■	■	■
Prednosti koncepta u usporedbi s drugim konceptima, tekstualno	□	■	□	□	□
Nedostaci koncepta u usporedbi s drugim konceptima	□	□	□	■	□
Prednosti koncepta u usporedbi s konceptom A, tekstualno	□	■	□	■	■
Nedostaci koncepta u usporedbi s konceptom A, tekstualno	□	□	□	■	□
Kvalitativni ili kvantitativni podaci o potrošnji energije, vode ili deterdženta, tekstualno	□	■	□	■	■
Kvalitativni ili kvantitativni podaci o životnom ciklusu proizvoda i utjecajima na okoliš (životni vijek, ugljični otisak, emisije ...)	□	□	□	□	□
Kvalitativni ili kvantitativni podaci o materijalima komponenata, tehnološkim postupcima proizvodnje, recikliranim materijalima, rastavljalivosti itd.	□	□	□	□	□

Oznake: dostupnost informacija sudionicima studije: ■ – dostupno, □ – nije dostupno.

Sudionici studije prvo su dobili uvid u koncepte i obrasce na kojima su bili upućeni zapisati rangiranje koncepata. Koncepti su im predloženi tekstualno i vizualno (tablica 3.7.). Funkcije i radni principi koncepata, sudionicima su prezentirani tekstualnim opisom te su im, gdje je to bilo moguće, oblikovanje i forma proizvoda predloženi slikom, izometrijskim prikazom uređaja, ali bez prikaza karakterističnih presjeka ili komponenata proizvoda.

Tek nakon završetka prvoga vrednovanja i rangiranja koncepata, sudionicima studije predloženi su kriteriji ekološke prihvatljivosti prema kojima su proveli drugo po redu

vrednovanje ekološke prihvatljivosti i rangiranje sada već dobro poznatih koncepata proizvoda. Kriteriji ekološke prihvatljivosti definirani su na temelju smjernica za ekološki prihvatljivo oblikovanje (smjernice *Eco-Design Value* [82]). Radi se o izjavama o obilježjima ekološki prihvatljivih proizvoda. Svaka smjernica (izjava) predočuje po jedan kriterij ekološke prihvatljivosti.

Sudionici studije upućeni su na to da razmotre svaku smjernicu (kriterij ekološke prihvatljivosti) i ocijene svaki koncept jednom od sljedećih triju ocjena. Ako je izjava o konceptu opisivala, odnosno bila svojstvena razmatranom konceptu, sudionici su bili upućeni da odgovor označe tvrdnjom ‘Da, izrazito’, čime su zabilježili pozitivnu korelaciju između ekološke prihvatljivosti i razmatranog koncepta. Ako u suprotnom, izjava o konceptu nije opisivala razmatrani koncept, tj. obilježja koncepta smatrana su upravo suprotnima kriteriju ekološke prihvatljivosti opisanom smjernicom, sudionici su bili upućeni da odgovor označe tvrdnjom ‘Ne, naprotiv’, čime su zabilježili negativnu korelaciju između ekološke prihvatljivosti i razmatranog koncepta. Kao treću opciju sudionici su mogli označiti odgovor ‘Ne mogu procijeniti’. čime su zabilježili da ne mogu definirati ni pozitivnu ni negativnu korelaciju između izjave i razmatranog koncepta, a zbog nedostatka podataka o konceptu koji bi im omogućili pravovaljanu procjenu ili zbog nerazumijevanja značenja pojedinoga kriterija ekološke prihvatljivosti, odnosno *Eco-Design Value* smjernice [82].

Nakon označivanja korelacija između svih 50 smjernica i 5 koncepata, sudionici studije upućeni su da dodijele bodove ocjenama korelacija. Sustav bodovanja definiran je na način da je bilo potrebno dodijeliti jedan (1) bod za svaku pozitivnu korelaciju, minus jedan (-1) bod za svaku negativnu korelaciju i nula (0) bodova za svaku neutralnu korelaciju između izjave (*Eco-Design Value* smjernice) i koncepta. Potom su sudionici trebali zbrojiti ukupni broj bodova za svaki od pet koncepata zasebno te se ocjenama koncepta ravnati pri rangiranju koncepata prema ekološkoj prihvatljivosti. Prije izvođenja studije slučaja sudionici nisu bili upoznati s *Eco-Design Value* smjernicama [82], pa se može zaključiti da se njima koriste prvi put.

Svakom je sudioniku studije dodijeljen po jedan primjerak od ukupno četiriju grupa obrazaca: a) prezentacija koncepata proizvoda, b) obrazac za prvo rangiranje, c) obrazac za vrednovanje i drugo rangiranje, i d) upitnik (slika 3.7.).



**Slika 3.7.** Obrasci za zapisivanje vrednovanja i rangiranja u studiji slučaja

Nakon završetka vrednovanja, dakle nakon prvog i drugog rangiranja koncepata prema ekološkoj prihvatljivosti, sudionici su bili upućeni da ispune kratak upitnik. Upitnik je služio za bilježenje komentara sudionika o rezultatima prvog i drugog rangiranja koncepata. Tijekom provedbe studije sudionici nisu imali uvid u rangiranja ostalih sudionika. Iako se studija slučaja obavljala u laboratorijskim uvjetima te su sudionici bili smješteni na dovoljnoj udaljenosti jedni od drugih i nije bilo komunikacije ili rasprave među sudionicima studije, može se zaključiti da je riječ o rezultatima rangiranja zbog individualnog vrednovanja sudionika studije.

Prva faza studije u kojoj su se sudionici upoznali s konceptima i vrednovali koncepte tako da su ih rangirali od ekološki najprihvatljivijeg do ekološki najmanje prihvatljivog trajala je 15 minuta. Drugu i treću fazu studije činili su drugi krug vrednovanja i ispunjavanje upitnika u ukupnom trajanju od 45 do 60 minuta. Sudionici nisu bili ograničeni vremenom potrebnim za izvršavanje zadataka u studiji. Prethodno im je pri obavještanju o temi, mjestu i datumu provođenja studije rečeno da se ukupno trajanje studije procjenjuje na nekoliko sati, i ne više od jednog dana.

#### 3.2.5. Rezultati studije slučaja

Većina ispitanika u studiji slučaja pri prvom rangiranju ocijenilo je koncept B i koncept C kao ekološki najprihvatljivije konceptijske varijante (tablica 3.8.). Sedam od ukupno jedanaest sudionika studije ocijenilo je koncept ultrazvučnog pranja kao ekološki najprihvatljiviji među konceptima, dok je preostalo četvero sudionika procijenilo da je koncept pranja pjenom deterdženta i vode ekološki najprihvatljiviji koncept od ponuđenih. Sudionici nisu imali uvid u vrednovanje, rangiranje ili zaključke ostalih sudionika u studiji pa stoga pri rangiranju koncepata nisu bili vođeni mišljenjem ostalih sudionika u studiji.

Pri rangiranju u prvom dijelu studije koncepti A, D i E ocijenjeni su ekološki manje povoljnim varijantama te s ravnomjernom distribucijom rezultata rangiranja. Po četiri sudionika smatrala su da su koncept pranja polimernim kuglicama i koncept pranja suhim ledom najmanje ekološki prihvatljivi od ukupno pet ponuđenih koncepata. No, istodobno je pet sudionika studije koncept pranja suhim ledom ocijenilo drugom ekološki najprihvatljivijom varijantom. Koncept pranja suhim ledom četiri sudionika rangirala su kao srednje ekološki prihvatljivu varijantu, ali druga četiri sudionika ocijenila su taj koncept kao ekološki najmanje prihvatljivi koncept od ponuđenih.

**Tablica 3.8.** Rezultati prvog i drugog rangiranja ekološke prihvatljivosti koncepata od sudionika studije slučaja

Rangiranje (1 ÷ 5)	Subjektivno vrednovanje ekološke prihvatljivosti					Semikvantitativno vrednovanje ekološke prihvatljivosti (kriteriji propisani smjernicama <i>Eco-Design Value</i> [82])				
1 najbolje ocijenjeni koncept	C (7)			B (4)		C (6)		B (4)		A (1)
2	D (5)	C (3)	A (1)	B (1)	E (1)	B (5)	A (3)	C (2)	D (1)	
3	E (4)	B (3)	D (2)	A (1)	C (1)	E (4)	A (3)	C (2)	B (1)	D (1)
4	A (6)		B (3)		E (2)	E (5)	D (3)	A (2)	C (1)	
5 najlošije ocijenjeni koncept	D (4)		E (4)		A (3)	D (6)	A (2)	E (2)	B (1)	

Oznake: koncept A – pranje deterdžentom i toplom vodom; koncept B – pranje pjenom deterdženta i vode; koncept C – ultrazvučno pranje; koncept D – čišćenje suhim ledom; koncept E – pranje polimernim kuglicama; broj u zagradi () – broj sudionika koji su dodijelili rang konceptu (od najviše mogućih 11 koliko je ukupan broj sudionika studije)

Rezultati prvog rangiranja govore o dvama viđenjima ekološki manje prihvatljivih koncepata. Statistički značajna većina ispitanika koncept D smješta među ekološki najprihvatljivije, dok druga statistički značajna većina isti koncept ocjenjuje jednim od ekološki najmanje prihvatljivih. U prvom dijelu studije, kada ispitanicima nisu bili eksplicitno ponuđeni kriteriji ekološke prihvatljivosti, ispitanici su bili skloni precijeniti ili podcijeniti ekološku prihvatljivost koncepata, što je vidljivo iz rangiranja koncepata D i E. Pri drugom vrednovanju koncepata prema eksplicitno ponuđenim kriterijima ekološke prihvatljivosti, sudionici su zabilježili velik broj nepoznanica o korelaciji kriterij – koncept (tablica 3.9).

Pri drugom rangiranju istih pet koncepata ispitanici su se služili semikvantitativnom metodom i kriterijima ekološke prihvatljivosti propisanim smjernicama *Eco-Design Value*



[82]. Tijekom drugog rangiranja koncepta nije pojavila situacija kao što je to bio slučaj pri prvom rangiranju, kada su postojala suprotstavljena mišljenja oko istog koncepta (npr. koncept D u prvom rangiranju). Koncept D ocijenjen je ekološki neprihvatljivim rješenjem u drugom rangiranju, dok su pri prvom rangiranju ispitanici bili podijeljeni glede svojih ocjena ekološke prihvatljivosti tog koncepta.

**Tablica 3.9.** Pregled rezultata nakon bodovanja zbog drugog po redu rangiranja, kada su sudionici studije vrednovali koncepte prema Eco-Design Value smjernicama [82]

2. rangiranje	Bodovi za pozitivne korelacije po konceptu ('+1')	Bodovi za negativne korelacije po konceptu ('-1')	Zbroj bodova po konceptu ('+1' + '-1')	Bodovi za neutralne korelacije po konceptu ('0')
1 = C najbolje ocijenjeni koncept	$\bar{x} = 20,54$ $X = 20$ $R = 8 \div 34$ $\sigma = 7,06$	$\bar{x} = 6,81$ $X = 6$ $R = 2 \div 17$ $\sigma = 3,83$	$\bar{x} = 20,54 - 6,81 = 13,73$ $X = 20 - 6 = 14$	$\bar{x} = 22,36$ $X = 25$ $R = 10 \div 33$ $\sigma = 6,19$
2 = B	$\bar{x} = 24,63$ $X = 25$ $R = 15 \div 37$ $\sigma = 7,03$	$\bar{x} = 10,27$ $X = 10$ $R = 0 \div 28$ $\sigma = 7,47$	$\bar{x} = 14,36$ $X = 15$	$\bar{x} = 14,09$ $X = 15$ $R = 3 \div 23$ $\sigma = 6,89$
3 = A	$\bar{x} = 23,45$ $X = 22$ $R = 13 \div 45$ $\sigma = 8,58$	$\bar{x} = 14,09$ $X = 14$ $R = 0 \div 26$ $\sigma = 6,85$	$\bar{x} = 9,36$ $X = 8$	$\bar{x} = 12,45$ $X = 13$ $R = 2 \div 28$ $\sigma = 7,99$
4 = E	$\bar{x} = 12,36$ $X = 12$ $R = 0 \div 24$ $\sigma = 6,94$	$\bar{x} = 11,36$ $X = 9$ $R = 4 \div 29$ $\sigma = 6,75$	$\bar{x} = 1$ $X = 3$	$\bar{x} = 26$ $X = 30$ $R = 7 \div 40$ $\sigma = 10,21$
5 = D najlošije ocijenjeni koncept	$\bar{x} = 12,63$ $X = 12$ $R = 0 \div 31$ $\sigma = 8,31$	$\bar{x} = 14,09$ $X = 16$ $R = 13 \div 28$ $\sigma = 6,2$	$\bar{x} = -1,45$ $X = -4$	$\bar{x} = 23,27$ $X = 24$ $R = 13 \div 28$ $\sigma = 4,41$

Oznake: koncept A – pranje deterdžentom i toplom vodom; koncept B – pranje pjenom deterdženta i vode; koncept C – ultrazvučno pranje tekstila; koncept D – čišćenje suhim ledom; koncept E – pranje polimernim kuglicama;  $\bar{x}$  – aritmetička sredina;  $X$  – geometrijska sredina;  $R$  – raspon;  $\sigma$  – standardna devijacija rezultata.  $\bar{x}$ ,  $X$ ,  $R$  i  $\sigma$  odnose se na uzorak veličine 11 (broj sudionika u studiji slučaja)

Rezultati drugog rangiranja pokazuju bolju distribuciju glasova za koncepte C, D, B i E za pripadajući rang, no i veću (a time i lošiju) distribuciju glasova za koncept A. To bi značilo da, ako ispitanici trebaju postići konsenzus i generirati jedinstveno rangiranje, dodjeljivanje ranga konceptu A temeljilo bi se na odluci o tome je li koncept A ekološki prihvatljiviji od koncepta E. Konceptu E ispitanici su dodijelili najviše bodova za neutralne korelacije kriterij – koncept (tablica 3.8.), što je pokazatelj da su u slučaju tog koncepta imali i najviše nepoznanica o konceptu, možda funkcionalnim značajkama koncepta ili nisu mogli odrediti ekološku prihvatljivosti ili neprihvatljivost s obzirom na za studiju znatno velik broj kriterija.

Rezultati prvog i drugog rangiranja pokazuju da su ispitanici rangirali koncepte C i B kao ekološki najprihvatljivije od ukupno pet razmatranih koncepata. Rezultati prvog rangiranja ostalih koncepata ne pokazuju tako jednoznačne rezultate. Naime, konceptu D jedan dio ispitanika dodjeljuje rang 2 (kao drugom po redu ekološki najprihvatljivijem konceptu), a drugi jednako statistički značajan dio ispitanika taj koncept smješta na zadnje mjesto kao ekološki neprihvatljiv koncept.

Rezultati prvog rangiranja u kojemu su sudionici rangirali koncepte prema ekološkoj prihvatljivosti i rezultati drugog rangiranja gdje su to učinili koristeći se semikvantitativnom metodom i kriterijima ekološke prihvatljivosti *Eco-Design Value* [82], pokazuju da je drugim po redu rangiranjem provedenim u studiji slučaja moguće dobiti koherentnije rezultate rangiranja negoli je to slučaj kada se ispitanici nisu služili semikvantitativnom metodom i kriterijima ekološke prihvatljivosti [63]. Ovakav ishod vrednovanja mogao je biti očekivan zbog toga što u prvom rangiranju sudionici subjektivno rangiraju koncepte, a u drugom rangiranju imaju ujednačenije kriterije zbog eksplicitnih kriterija ekološke prihvatljivosti. Skup koncepata pranja rublja koje su sudionici studije vrednovali i rangirali kvalitativno prema ekološkoj prihvatljivosti odabrani su kao reprezentativni slučaj na temelju kojeg će se provesti validacija kriterija ekološke prihvatljivosti i predložene metode vrednovanja koje čine glavne doprinose istraživanja opisanog u ovome doktorskom radu.

Nakon završetka prvog i drugog vrednovanja konstruktori su bili upućeni na ispunjavanje ankete o rezultatima vrednovanja, konceptima i studiji općenito. Rezultati vrednovanja u prvom dijelu studije pokazuju da konstruktori nisu jedinstveno odgovorili na pitanje o manje ekološki povoljnim konceptijskim rješenjima, odnosno o tome koje koncepte smatraju ekološki neprihvatljivima. Tablica 3.8. pokazuje da su mišljenja bila podijeljena između triju koncepata: koncepta A, D i E. Kada su vrednovali spomenute koncepte prema eksplicitno ponuđenim kriterijima ekološke prihvatljivosti u drugom dijelu studije, konstruktori su zabilježili vrlo velik broj nepoznanica o korelaciji kriterij – koncept (tablica 3.8.). Prema tome, vrednovali su ekološku prihvatljivost tih koncepata unatoč manjku detaljnijih podataka o konceptima ili podacima o kriterijima ekološke prihvatljivosti. Odgovori i komentari konstruktora koje su dali u anketi također govore o tome da nisu imali dovoljno podataka primjerice o konceptu pranja rublja suhim ledom.



### 3.3. Rasprava o studiji slučaja i zaključci

Analiza je pokazala da, kada su kvalitativne ekodizajnerske smjernice primijenjene kao kriteriji ekološke prihvatljivosti, postoji veća vjerojatnost pronalaženja konsenzusa oko ekološki neprihvatljivih varijanti nego kada je vrednovanje bilo temeljeno na subjektivnim kriterijima ekološke prihvatljivosti sudionika studije.

Tijekom rangiranja koncepata u prvom rangiranju, kada su sudionici imali zadatak rangirati koncepte proizvoda prema ekološkoj prihvatljivosti vodeći se isključivo subjektivnim mišljenjem pri vrednovanju, možemo govoriti o nastanku situacije poznate kao Arrowljev ili Condorcetov paradoks [291]. Rezultati rangiranja prema pravilu većine upućuju na nekonzistentnost vrednovanja unatoč poznatim i jasno definiranim kriterijima, tj. nema konsenzusa o Condorcetovu pobjedniku.

Rezultati drugog rangiranja tijekom kojeg su se ispitanici služili semikvantitativnom metodom za dodjeljivanje ocjena prema kriterijima propisanim smjernicama *Eco-Design Value* [82] upućuju na to da takav uređeni sustav vrednovanja kojim se pripisuju kriteriji i način ocjenjivanja prema njima dovodi do boljih rezultata, odnosno potencijalno boljih rezultata rangiranja za postizanje konsenzusa o vrednovanju koncepata nego kada tog sustava nije bilo (prvi krug rangiranja). To je posebno očito pri rangiranju koncepata koje su sudionici smatrali ekološki neprihvatljivima.

Studija slučaja kvalitativna je metoda istraživanja te je time potrebno uzeti u obzir čimbenike na koje se nije moglo utjecati nacrtom studije, a koji potencijalno mogu imati utjecaj na rezultate studije slučaja.

#### 1. Informacije o konceptima proizvoda

Koncepti koje su ispitanici vrednovali u studiji razlikuju se u detaljima i tehničkim rješenjima. U nekim je slučajevima koncept definiran na temelju informacija o prototipu razvijenom za potrebe testiranja koncepta (koncept C), a u drugim slučajevima nedostaju ključne informacije o tehničkim rješenjima koncepta (koncept D). Skup konceptijskih rješenja koji je predložen ispitanicima stoga sadržava koncepte koji su više i manje poznati sudionicima studije. Procjenjuje se da je razina tehničke nesigurnosti koncepata znatno varirala od koncepta do koncepta, što je moglo utjecati na ocjenu tehničke izvedivosti i pretpostavke o kvaliteti i učinkovitosti procesa pranja, koju su donijeli sudionici studije te na ocjene ekološke prihvatljivosti pojedinih koncepata.

## 2. Broj koncepata i redoslijed kojim su koncepti predloženi ispitanicima

Informacije o konceptima podijeljene su ispitanicima na obrascima te, kako bi se omogućilo bilježenje dodjeljivanja bodova u drugom rangiranju, redoslijed kojim su koncepti predloženi ispitanicima bio je predodređen nacrtom studije (redoslijed: A, B, C, D, E).

## 3. Rangiranje u drugom krugu ispitanici su imali provesti na temelju pravila većine

Ispitanici su u prvome krugu vrednovanja dobili uputu da rangiraju koncepte prema ekološkoj prihvatljivosti, a kriteriji ekološke prihvatljivosti i način dodjeljivanja ranga konceptima nisu im bili eksplicitno zadani. U drugome krugu studije upućeni su da vrednovanje i rangiranje istih koncepata provedu tako da se vode uputama o dodjeljivanju bodova korelaciji koncept – kriterij ('+1', '0' ili '-1').

## 4. Broj kriterija i redoslijed ocjenjivanja prema kriterijima u drugome krugu rangiranja

Smjernice *Eco-Design Value* [82] sastoje se od ukupno 50 smjernica (kriterija), te su one potpuno preuzete kao kriteriji ekološke prihvatljivosti prema kojima su ispitanici u drugome krugu imali vrednovati koncepte.

## 5. Redoslijed metoda rangiranja propisanih nacrtom studije slučaja (prvo rangiranje bez eksplicitnih kriterija ekološke prihvatljivosti i drugo rangiranje temeljeno na primjeni metode i kriterija ekološke prihvatljivosti koji su *Eco-Design Value* smjernice [82])

Prvo rangiranje koncepata koje su proveli ispitanici rezultat je njihova subjektivnog ocjenjivanja ekološke prihvatljivosti razmatranih koncepata. Kako su nakon prvog rangiranja, koncepte ocjenjivali još jednom pri drugom rangiranju, ocjena ekološke prihvatljivosti pri prvom rangiranju mogla je utjecati na ocjenu ekološke prihvatljivosti pri drugom rangiranju,. Ipak, budući da je u drugome krugu vrednovanja bilo potrebno vrednovati pet koncepata s obzirom na 50 kriterija ekološke prihvatljivosti, a tek potom zbrojiti rezultate vrednovanja radi rangiranja koncepata, zaključak je da su mogućnosti da sudionici namjeste rezultate drugog rangiranja bile minimalne i time zanemarive.

## **4. KRITERIJI I PRIJEDLOG METODE VREDNOVANJA EKOLOŠKE PRIHVATLJIVOSTI**

*U ovom se poglavlju predočuju kriteriji ekološke prihvatljivosti namijenjeni vrednovanju ekološke prihvatljivosti u konceptualnoj fazi razvoja tehničkih sustava. S obzirom na to da je kvantitativno vrednovanje ekološke prihvatljivosti proizvoda uobičajenim metodama poput procjene životnog ciklusa proizvoda namijenjeno kasnijim fazama procesa konstruiranja, u ovom je istraživanju razvijena metoda vrednovanja ekološke prihvatljivosti za fazu koncipiranja. Metoda je objašnjena na ilustrativnim primjerima.*

---

### **4.1. Motivacija za razvoj kriterija i metode**

Fitch i Cooper [60] upozoravaju na problem vrednovanja i usporedbe ekološke prihvatljivosti koncepata proizvoda koji su originalan dizajn. Takvi koncepti na inovativan način ostvaruju glavnu funkciju proizvoda, što se očituje u parcijalnim funkcijama, fizikalnim efektima i radnim principima ili principijelnim rješenjima.

Analizom funkcija koncepata koji su originalni dizajn Gilchrist [199] je uočio veći broj parcijalnih funkcija koncepata koji su originalni dizajn nego kod koncepata koji su adaptivni i varijantni dizajn. Iako veći broj parcijalnih funkcija može značiti i veći broj komponenata proizvoda (što će neposredno rezultirati dodatnim utjecajima na okoliš), ne može se općenito tvrditi da je broj parcijalnih funkcija jedini pokazatelj ekološke prihvatljivosti koncepta

proizvoda. Bernstein i drugi [50] te Sakao [53] pokazali su da utjecaji na okoliš mogu biti koncentrirani u parcijalnim rješenjima kojima se ostvaruju parcijalne, odnosno sporedne funkcije proizvoda. Povezivanje utjecaja na okoliš i parcijalnih funkcija proizvoda može biti temelj za vrednovanje ekološke prihvatljivosti koncepata proizvoda.

Za procjenu utjecaja na okoliš koja bi bila temelj vrednovanja ekološke prihvatljivosti nužno je generirati listu materijala proizvoda, znati proces proizvodnje, potrošnju energije i materijala u životnom ciklusu proizvoda. S obzirom na to da su podatci o proizvodu koji bi omogućili procjenu utjecaja na okoliš dostupni tek u fazi detaljiranja, a koncepti koji su originalan dizajn uobičajeno nemaju referentnih proizvoda, metode koje su razvili Bernstein i drugi [50], Sakao [53] i Gilchrist [199] nisu prikladne za vrednovanje ekološke prihvatljivosti koncepata originalnog dizajna u konceptualnoj fazi.

Tijekom procesa konstruiranja, rješenje proizvoda mora zadovoljiti korisničke potrebe i zahtjeve koje determiniraju funkcionalne značajke rješenja [26], [121]. Životni vijek proizvoda jest kriterij ekološke prihvatljivosti i to preko zahtjeva koji se odnose na performanse, kvalitetu, proizvodnju, pouzdanost proizvoda tijekom eksploatacije i rada, održavanja, reciklabilnosti i troškova [33]. Navedeni zahtjevi i kriteriji ekološke prihvatljivosti uzimaju se u obzir u kasnijim fazama razvoja proizvoda [33].

Kvalitativno vrednovanje ekološke prihvatljivosti u konceptualnoj fazi procesa konstruiranja podrazumijeva višekriterijsko ocjenjivanje ekološke prihvatljivosti razmatranih koncepata. Kvalitativne metode zahtijevaju relativno veliko znanje i iskustvo pri primjeni tih metoda i alata jer je interpretacija ekološke prihvatljivosti koncepata subjektivna. Ocjene koncepta prema ostalim kriterijima vrednovanja mogu utjecati na percepciju ekološke prihvatljivosti koncepta pri primjeni kvalitativnih metoda vrednovanja. Na vrednovanje ekološke prihvatljivosti koncepata mogu utjecati ocjene koncepta prema drugim kriterijima vrednovanja kao što su troškovi, tehnička izvedivost i funkcionalni zahtjevi. Nedostatak informacija o pojedinom konceptu proizvoda (za koje u pravilu nije provedena konstrukcijska razrada) također može utjecati na vrednovanje ekološke prihvatljivosti pa se ekološka prihvatljivost takvog koncepta može podcijeniti ili precijeniti.

Osim problema koji se pojavljuju pri vrednovanju konceptijskog rješenja (koje je, u pravilu, u ranim fazama procesa konstruiranja apstraktno), u različitim fazama razvoja proizvoda postoje različiti zahtjevi za svaki oblik ishoda iz pojedine faze konstruiranja (od koncepta, preko definiranja oblika, materijala, strukture, detaljiranja i plana proizvodnje) pa

su i kriteriji za odlučivanje nakon svakog koraka različiti ovisno o tome je li riječ o koncipiranju, oblikovanju, detaljiranju ili planiranju proizvodnje.

Prikupljanje informacija i vrednovanje koncepata prethode odlučivanju o konceptima [292]. Hansen [293] se bavio analizom procesa donošenja odluke o konceptu i razlozima zbog kojih se odlučivanje provodi. Odlučivanje se provodi radi [293]:

- odabira rješenja iz skupa mogućih rješenja ili alternativa
- potvrde odabira rješenja
- prikupljanja informacija o razmatranim rješenjima i pretraživanja skupa mogućih rješenja i alternativa
- utvrđivanja liste specifikacija te
- analize donesenih odluka i formulacije zaključka o konzistentnosti odluka ili ciljeva konstruiranja.

Istraživači Collado-Ruiz i Ostad-Ahmad-Ghorabi [264] predlažu da se vrednovanje i procjena ekološke prihvatljivosti razmatranih ideja proizvoda provede *LCA* metodom, dakle kvantitativnim metodama procjene utjecaja proizvoda na okoliš. Takav pristup implicira razvoj razmatranih ideja, njihovo razrađivanje, upotpunjivanje i nadograđivanje barem do razine konstrukcijske razrade. U kasnijim fazama procesa konstruiranja smanjena je mogućnost uvođenja promjena sa svrhom smanjivanja utjecaja proizvoda na okoliš, jer su odluke o konceptijskom rješenju, funkcijama proizvoda, strukturi proizvoda i radnim principima proizvoda tada već donesene.

Analiza proizvoda i primjena metoda koje služe analizi proizvoda moguće su samo ako postoji dovoljno podataka o proizvodu, odnosno ako su poznati ključni parametri proizvoda. U ranim fazama, odluke glede kvalitete i uspješnosti proizvoda te utjecaja na okoliš donose se na temelju kvalitativnoga vrednovanja, odnosno na osnovi podataka koji kvalitativno opisuju proizvod [294]. Pritom se uobičajeno ne razmatraju učinci životnog vijeka proizvoda zbog nedostatka pouzdanih podataka.

Pregledom literature i na osnovi rezultata studije slučaja ustanovljeno je da postojeće metode nisu odgovarajuća potpora vrednovanju ekološke prihvatljivosti u konceptualnoj fazi. Slično kao i u slučaju ekodizajnerskih listi kriterija ekološke prihvatljivosti, vrednovanje ekološke prihvatljivosti s pomoću *LiDS-Wheel* alata [147] ovisi o stručnosti i iskustvu

korisnika alata [52]. Alati temeljeni na *QFD-u* razlikuju se od *LCA* alata po tome što se primjenjuju pri definiranju i razmatranju specifikacija proizvoda [53].

Rezultati studije slučaja pokazuju da bi kvalitativni generički kriteriji ekološke prihvatljivosti koje su sudionici studije primijenili pri vrednovanju ekološke prihvatljivosti mogli biti primjereni za vrednovanje ekološke prihvatljivosti konceptijskih rješenja. Metoda vrednovanja koja se temelji na kvalitativnim kriterijima ekološke prihvatljivosti pokazala se boljim načinom vrednovanja od vrednovanja kada kriteriji nisu bili eksplicitno određeni. No, studija otvara sljedeća pitanja: 1. je li broj kriterija odgovarajući, 2. je li vrsta kriterija odgovarajuća i 3. je li metoda vrednovanja kojom se rangiraju konceptijska rješenja odgovarajuća za potrebe vrednovanja ekološke prihvatljivosti u konceptualnoj fazi pri vrednovanju više od dvaju konceptijskih rješenja odjednom?

Kriteriji ekološke prihvatljivosti propisani kvalitativnim i semikvantitativnim metodama vrednovanja ekološke prihvatljivosti koncepata koje su bile kandidati za studiju slučaja (tablica 3.1. i tablica 3.2.) propisuju razmatranje pojedinih aspekata ekološke prihvatljivosti proizvoda tijekom njegova životnog ciklusa. Riječ je o potrošnji energije ili materijala [147], strategijama za postizanje veće ekoeфикаsnosti [120], [146]) i smjernicama za ekološki prihvatljivo oblikovanje proizvoda [82]. Spomenute metode nisu primjerene za vrednovanje u konceptualnoj fazi jer kriteriji koje propisuju u velikoj mjeri zahtijevaju kvantificiranje utjecaja na okoliš ili značajki proizvoda koje upućuju na taj utjecaj. Podatci o proizvodu koji su dostupni u konceptualnoj fazi uobičajeno nisu potpuni, a time ne omogućuju konstruktorima da ocijene ekološku prihvatljivost na temelju podataka o utjecajima na okoliš ili na osnovi podataka o potrošnji materijala i energije tijekom životnog vijeka proizvoda.

Straton [295] smatra da je vrednovanje općenito usko povezano s definicijom kvalitete i kapaciteta koji su svojstveni razmatranim rješenjima. Kvaliteta može biti određena uspoređivanjem skupa svojstvenih značajki rješenja sa skupom svojstvenih zahtjeva ili kriterija kvalitete.

Prema Stratonu [295], pojam kapaciteta odnosi se na učinak proizvoda ili rješenja proizvoda koji je moguće kvantificirati. S obzirom na to da kvantifikacija latentnih efekata na okoliš nije uobičajena tijekom konceptualne faze [114], kapacitet proizvoda je primjerenije izraziti pojmom koji bi opisivao svrhu i funkcionalnost proizvoda te potencijal preliminarnoga rješenja da ostvari neki zadani rad ili učinak. Podatci u obliku transformacija energije, materijala i signala koje proizvod treba ostvariti time su primjereniji pojmovi od kapaciteta jer predložuju, s jedne strane, apstraktnu formulaciju zadaća proizvoda

(transformaciju energije, materijala i signala, i izlazne tjekeve transformacija), a, s druge strane, konkretnu definiciju načina na koji će se te zadaće ostvarivati (fizički efekti i radni principi). Nastojanje da se zadovolje funkcionalni zahtjevi u pozadini je svakoga daljnjeg odlučivanja o proizvodu, njegovim oblikovnim rješenjima, konstrukciji i komponentama, a radni principi i lanci fizikalnih efekata govore o tome kako će ti zahtjevi biti ostvareni, odnosno o konceptijskom rješenju proizvoda.

Teorija tehničkih sustava ([64], [65], [66]) poslužila je kao teorijski okvir hipoteze istraživanja da je moguće provesti vrednovanje ekološke prihvatljivosti na temelju značajki transformacija operanada tehničkoga procesa za određenu funkcijsku strukturu u konceptualnoj fazi procesa konstruiranja.

Teorija tehničkih sustava bavi se artefaktima koji su nastali kao proizvod tehnike, tj. tehničkim sustavima za koje je bitno da poznamo njihovo ponašanje, kao i metode i procese koji su zaslužni za njihov nastanak. Tehnički sustavi određeni su ulogom koju imaju u transformacijskom sustavu određenom tehničkim procesom i tehničkim sustavom koji su u interakciji sa živim bićima i okolišem. Transformacijski sustav sastoji se od fizički opipljivih dijelova, kao i dijelova koji su u interakciji s okolinom. Zadaća je tog sustava ostvariti glavnu funkciju te ulazne operande transformirati u izlazne kako bi tehnički sustav tražene fizikalne efekte isporučio tehničkom procesu, a s pomoću određene tehnologije.

Operandi (energija, materijal ili signal) transformiraju se u tehničkom procesu, a podržani su efektima u vezi s čovjekom, okolišem ili tehničkim sustavom. Iako postoji velik broj različitih tumačenja pojma funkcije i metoda kojima se propisuje način na koji se modeliraju funkcije proizvoda [296], usporedivost proizvoda ili koncepata proizvoda osigurava se tako da se razmatraju proizvodi ili koncepti s istom glavnom funkcijom, odnosno svrhom.

Potrebe za ostvarivanje funkcije tehničkog sustava zadovoljene su određenim stanjem operanada (materijala, energije i informacija) koji se transformiraju u tehničkome procesu. Željeno stanje operanada postiže se transformacijskim procesima iz postojećih (početnih) stanja operanada unutar zadanog ili danog okoliša koji je od vanjskog svijeta ili okoliša odijeljen granicom sustava.

Prema definiciji značajki tehničkih artefakata (tehničkih proizvoda) [297], proizvodi su definirani funkcionalnim značajkama (ispunjavanju određenu funkciju i svrhu) i fizičkim obilježjima, tj. značajkama oblika. Određivanje funkcionalnosti proizvoda smatra se

fundamentalnim korakom u konstruiranju i razvoju proizvoda [7], [11], [72], [164], [296]. Roth [298] propisuje posebne vektorske i geometrijske načine opisivanja funkcija proizvoda, Hubka i Eder [65] definiraju tvorbu organa, a Pahl i drugi [72] principijelna rješenja kao sljedeći korak nakon definiranja funkcija proizvoda.

Principijelna rješenja prva su indikacija forme, a principijelno rješenje mora biti konkretizirano s pomoću geometrijskih značajki [299]. Radni principi na prvoj razini konkretizacije proizvoda predloženi su upravo principijelnim rješenjima. Skup fizikalnih efekata (s geometrijskim i materijalnim karakteristikama) naziva se radnim principom. Fizikalni su efekti osnovne fizikalne značajke koje se mogu odrediti i opisati temeljnim zakonima održanja energije i materijala te međusobno povezanih fizikalnih veličina.

Analize lanaca efekata, latentnih tješkova energije, materijala i signala na okoliš te transformacija kojima su opisane pretvorbe ulaza u izlaze [72], odabrani su kao temelj vrednovanja ekološke prihvatljivosti stoga što je u konceptualnoj fazi često potrebno generirati konceptijska rješenja koja su neutralna glede oblikovanja i detaljiranja principijelnih rješenja. Proces generiranja novih, kreativnih načina ostvarivanja parcijalnih rješenja može biti potpomognut raznim alatima, npr. primjenom morfološke matrice.

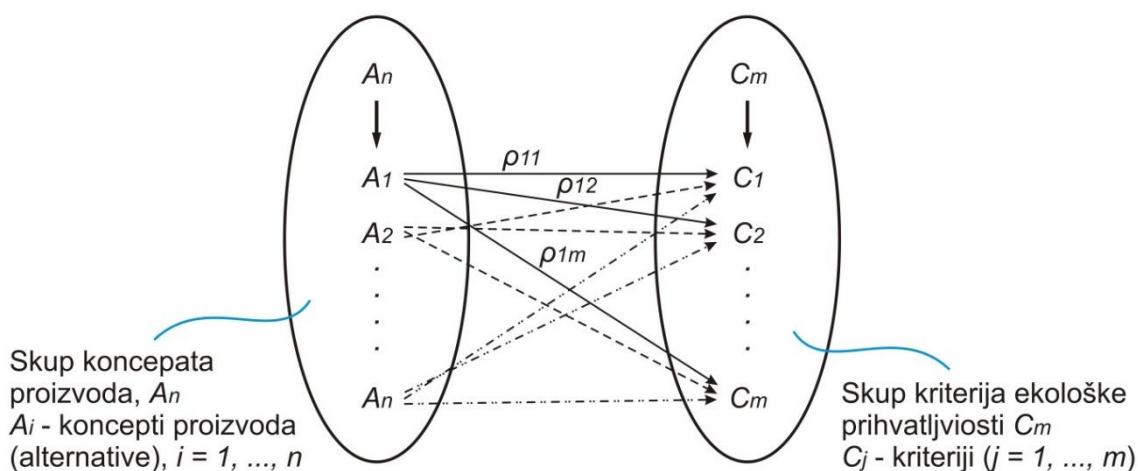
## 4.2. Metoda vrednovanja

Većina problema odlučivanja svodi se na razmatranje ključnih značajki konceptijskih rješenja. Dobrota konceptijskog rješenja temelji se na razmatranju svojstvenih značajki koncepta i uspoređivanju značajki koncepta prema kriterijima dobrote konceptijskoga rješenja. Vrednovanje konceptata u procesu konstruiranja uglavnom je višekriterijsko, tj. dobrota koncepta vrednuje se na temelju razmatranja dobrote konceptata prema nekoliko različitih kriterija. Kriteriji vrednovanja koncepta mogu biti troškovi proizvodnje, stupanj zadovoljenja potreba kupaca, kvaliteta izrade, prilagođenost ciljnom tržišnom segmentu, rizici, ekološka prihvatljivost, utjecaji na okoliš, operativni troškovi i drugi kriteriji. Valja naglasiti i da unatoč nabrojanim generičkim kriterijima vrednovanja konceptata postoje i drugi kriteriji koje mogu definirati konstruktori, a koji mogu biti specifični za određeni proizvodni ili tržišni sektor (automobilska industrija, razvoj kućanskih aparata, prehrambena industrija itd.) ili određeno poduzeće već prema specifičnostima poslovnog modela poduzeća i procedura povezanih s izvođenjem razvojnih procesa u pojedinom poduzeću.

Slika 4.1. prikazuje korelaciju između skupa konceptijskih rješenja i skupa kriterija prema kojima se svaki od razmatranih konceptata vrednuje. Skup kriterija uvjetovan je



skupom značajki konceptijskih rješenja. Značajke opisuju koncept, svrhu, tehnička rješenja, funkcije i funkcionalnost [300] te karakteristike koncepta.



**Slika 4.1.** Prikaz relacija između skupa koncepata i skupa kriterija vrednovanja (ilustrirano prema [301])

Preslikavanjem između skupa vrednovanih koncepata i skupa kriterija vrednovanja izvedena je matrica relacija  $M_R$ . Matrica relacija služi za prikaz ocjena dobrote koncepata  $A_i$  prema kriterijima vrednovanja  $C_j$  [301].

$$[M_R] = \begin{Bmatrix} \rho_{11} & \rho_{12} & \cdot & \rho_{m1} \\ \rho_{21} & \rho_{22} & \cdot & \rho_{m2} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \rho_{n1} & \rho_{n2} & \cdot & \rho_{nm} \end{Bmatrix} \quad (3)$$

Vrednovanje ekološke prihvatljivosti koncepata promatra se kao problem više-kriterijskog vrednovanja. Pritom je  $A = \{A_1, A_2, \dots, A_n\}$  konačan skup koncepata proizvoda, odnosno alternativa koja se vrednuju. Svaki koncept proizvoda iz skupa  $A$  moguće je vrednovati (ocijeniti) obzirom na  $m$  kriterija ekološke prihvatljivosti  $C = \{C_1, C_2, \dots, C_m\}$ , gdje je  $C$  konačan skup kriterija ekološke prihvatljivosti. Skupovi  $A$  i  $C$  jednako su brojni (ekvipotentni) sa skupom prirodnih brojeva  $N$  [302].

Ocjena ekološke prihvatljivosti koncepta  $A_i$  (učinak koncepta glede ekološke prihvatljivosti) s obzirom na kriterij ekološke prihvatljivosti  $C_j$ , jednaka je *stupnju zadovoljenja kriterija*  $x_j(A_i)$ ,  $\forall A_i \in A$ ,  $\forall C_j \in C$ . Višekriterijsko vrednovanje ocjenom ekološke prihvatljivosti za koncept  $A \in A_n$  definirano je vektorom

$x(A) = \{x_1(A), x_2(A), \dots, x_m(A)\}$ , koji se sastoji od pojedinačnih učinaka ili obilježja koncepta glede svakih od  $m$  kriterija ekološke prihvatljivosti.

		$x_1$	$x_2$	$\cdot$	$x_n$
		$A_1$	$A_2$	$\cdot$	$A_n$
$w_1$	$C_1$	$\rho_{11}$	$\rho_{12}$	$\cdot$	$\rho_{1m}$
$w_2$	$C_2$	$\rho_{21}$	$\rho_{22}$	$\cdot$	$\rho_{2m}$
$\cdot$	$\cdot$	$\cdot$	$\cdot$	$\cdot$	$\cdot$
$w_{1m}$	$C_m$	$\rho_{n1}$	$\rho_{n2}$	$\cdot$	$\rho_{nm}$

**Slika 4.2.** Opći prikaz matrice odlučivanja [303]

Nedostatak tehnike vrednovanja pomoću matrice odlučivanja (slika 4.2.) jest u tome što je kriterijima vrednovanja potrebno dodijeliti težinski koeficijent kojim se na kvantitativan način prikazuje važnost kriterija, donosno koliko pojedini kriterij pridonosi konačnoj ocjeni po svim kriterijima. Pritom vrijedi  $w_j(C_j) = \{w_1(C_1), w_2(C_2), \dots, w_m(C_m)\}$ , i  $\sum_{j=1}^m w_j = 1$ , odnosno zbroj težinskih faktora kriterija  $\forall C_j \in C$  iznosi 1.

Težinski faktori kriterija određen su udio pojedinoga kriterija u konačnoj ocjeni promatranog koncepta. Težinski koeficijenti koji se pridaju pojedinim kriterijima nemaju fizičko značenje, nego proizlaze iz iskustva ili su procijenjeni na subjektivan način. Time kvantitativna vrijednost dodijeljena kriterijima u obliku težinskih koeficijenata predočuje subjektivno dodijeljenu ocjenu važnosti kriterijima vrednovanja [304].

U literaturi nisu opisani znanstveno utemeljeni razlozi zbog kojih bi neki kriteriji ekološke prihvatljivosti imali prevagu nad ostalima. Primjer su tomu kriteriji propisani metodama i smjernicama ekodizajna kod kojih težinski faktori važnosti kriterija nisu definirani (tablica 3.1., tablica 3.2.). Byggeth i Hochschorner [46] ne predlažu smjernice za dodjeljivanje kvantitativne ocjene kvalitativnim kriterijima ekološke prihvatljivosti, ali se zalažu da takve smjernice i težinski koeficijenti važnosti kriterija budu razvijeni.

U teoriji odlučivanja postoji nekoliko metoda koje se razlikuju prema vrsti problema odlučivanja kojima su namijenjene (jedan ili više kriterija odlučivanja, razina nesigurnosti, područje primjene itd.). De Boer [305] navodi šest osnovnih koraka koji su temelj metoda vrednovanja i odlučivanja koje primjenjuju pri odlučivanju o konceptima tijekom procesa konstruiranja. Metode vrednovanja koje su temeljene na koracima (tablica 4.1.) mogu se provesti pomoću matrice odlučivanja (slika 4.2.). Radi se o primjerice Pughovoj metodi (engl. *Datum method*) [14], Analizi troškovi-dobit (engl. *Cost-Benefit analysis*) [72], Ocjenjivanju

konceptata (engl. *Concept Scoring*) [7] i drugima. Predložena metoda koristi matricu odlučivanja.

**Tablica 4.1.** Koraci vrednovanja prema de Boeru [305]

Korak	Opis
1.	Definirati kriterije vrednovanja i njihove vrijednosne ljestvice
2.	Definirati težinske koeficijente svakoga kriterija vrednovanja
3.	Odabrati (ili definirati) pravilo odlučivanja na temelju kojeg će se donijeti odluka
4.	Ustanoviti dobrotu svakog koncepta $e_{ij}(A_i)$ na temelju računanja obilježja koncepta $x_{ij}(A_i)$ i relativne važnosti kriterija $w_j$ te ukupnu vrijednost koncepta $V(A_i)$
5.	Usporediti dobrotu prema svakom od kriterija vrednovanja i za svaki koncept pojedinačno
6.	Donijeti odluku o konceptu na temelju pravila odlučivanja

Vrednovanje je moguće provesti ordinarnim metodama (metode rangiranja i metode klasifikacije) i kardinalnim metodama (metode ocjenjivanja) [90]. Ordinarne metode rangiranja i klasifikacije dijele se na metode rangiranja alternacijom i metode rangiranja usporedbom konceptata u parovima. Rangiranjem prema kriterijima obrazlaže se argumentacija za izbor konceptata, najčešće jednog ili dvaju konceptata za daljnju razradu. Negativno obilježje metoda rangiranja usporedbom konceptata u parovima (npr. većinsko pravilo [90]) jest sklonost generiranju rezultata vrednovanja identičnom Arrowljevom teoremu [291]. Rang dviju ili više alternativa može biti istovjetan zbog uspoređivanja s ostalim alternativama iz skupa, a rezultati rangiranja kontradiktorni i nejasni. Za predloženu metodu odabrana je tehnika rangiranja alternacijom.

Pregledom literature utvrđeno je da metodama i alatima ekodizajna nije propisana važnost kriterija ekološke prihvatljivosti u svrhu rangiranja alternativa. Treba naglasiti da je istraživanjem prikazanom u ovoj disertaciji predviđena jednaka važnost svih predloženih kriterija ekološke prihvatljivosti jer u literaturi nije nađeno opravdanje za različite težinske faktore kriterija.

Predložena metoda time je relativna, što znači da rezultati rangiranja vrijede samo za skup konceptata koji se vrednuje. Promjenom skupa konceptata promijenit će se i rangiranje pojedinih konceptata.

Apsolutne metode vrednovanja [90] primjenjuju se kada je moguće kvantificirati prag dobrote kriterija. Precizna i pouzdana kvantifikacija dobrote alternativa (procjena) provodi se tek u fazama nakon konceptualne faze [114], kada postoji dovoljno podataka o alternativu za

donošenje zaključaka o njoj na temelju kriterija. U obzir stoga dolaze samo metode vrednovanja koje ne zahtijevaju propisivanje relativne važnosti kriterija, odnosno daju koherentne rezultate i za slučaj jednakih relativnih važnosti kriterija vrednovanja.

Kardinalne su metode, za razliku od ordinarnih, metode ocjenjivanja pa stoga nisu pogodne za primjenu u slučaju vrednovanja ekološke prihvatljivosti.

Disjunkcija ili konjunkcija odnosi se na odabir načina agregiranja kriterija tijekom višekriterijskog vrednovanja [292]. Kod konjunktivnih metoda vrednovanje prema svim kriterijima razmatra se paralelno i simultano te su optimalna rješenja ona kod kojih postoji balans između dobrih i loših obilježja rješenja, odnosno kompenzacija loših obilježja dobrima [90]. Za predloženu metodu vrednovanja u obzir dolaze konjunktivne metode vrednovanja. Tablica 4.2. prikazuje obilježja razmatranih metoda višekriterijskoga vrednovanja.

**Tablica 4.2.** Usporedba metoda odlučivanja [292]

Metode odlučivanja o optimalnim konceptijskim rješenjima	Ordinarna	Kardinalna	Apsolutna	Relativna	Disjunktivna	Konjunktivna	Odabir	Eliminacija
analiza troškovi – dobit [72]		■		■		■	■	
ocjenjivanje koncepata [7]		■	■			■	■	
Pughova metoda [14]	■		■			■	■	
matrica odlučivanja [11]	■	(■)	■			■	■	
leksikografsko pravilo [90]	■		■		■		■	
eliminacija po kriterijima [90]	■		■		■			■
<i>Selection Chart</i> [72]	■			■	■		(■)	■
većinsko pravilo [90]	■			■	■		■	(■)
Copelandovo pravilo [90]	■		■		■		■	
suma rangova [90]	■			■		■	■	(■)
profil proizvoda [90]		■		■		■		

Oznake: ■ – da, (■) – metodu je moguće prilagoditi vrsti odlučivanja uz minimalne izmjene

Predložena metoda vrednovanja ekološke prihvatljivosti temeljit će se na vrednovanju prema kriterijima ekološke prihvatljivosti i metodi sume rangova. Rezultati predložene metode rabiće se za kombiniranje i poboljšavanje ili odabir konceptijskih rješenja za daljnju razradu. Tablica 4.3. prikazuje korake predložene metode prema De Boerovim preporukama [305].

**Tablica 4.3.** *Koraci predložene metode*

Koraci metode	Opis
<b>1. Definirati transformacije energije, materijala i signala te sekundarne efekte na okoliš za svako konceptijsko rješenje</b>	Transformacije energije, materijala i signala identificiraju i zapisuju u obliku lanaca efekata. Kao pomoć pri generiranju lanaca efekata preporučuju se sljedeće metode: izrada funkcijske strukture, modeliranje funkcija s pomoću tijeka, katalozi fizikalnih efekata, analiza tehničkog procesa, analiza radnih principa i analiza principijelnih rješenja.
<b>2. Definirati matricu kriterija i koncepata</b>	Definirano je pet kriterija ekološke prihvatljivosti te se prema vrijednosnim ljestvicama računa dobrotu svakoga pojedinog koncepta.
<b>3. Izračunati dobrotu koncepata obzirom na svaki od pet značajki koncepata definiranih kriterijima vrednovanja</b>	Značajke koncepata koje se razmatraju pri vrednovanju: <ul style="list-style-type: none"> <li>• ekoefektivnost pretvorbi energije i signala u tehničkom procesu</li> <li>• broj pretvorbi energije i signala u tehničkom procesu</li> <li>• ekološka prihvatljivost sekundarnih efekata na okoliš</li> <li>• broj sekundarnih efekata na okoliš</li> <li>• broj promjena agregatnoga stanja materijala u tehničkom procesu</li> </ul>
<b>4. Primijeniti sumu rangova</b>	Pravilo odlučivanja na temelju kojeg će se donijeti odluka jest suma rangova [90]. Prvo se konceptima dodjeljuje rang s obzirom na vrednovanje prema pojedinom kriteriju. Rang dobrote koncepta jest zbroj njegovih pojedinačnih rangova. Pobjednici su koncepti koji su najbolje rangirani prema najvećem broju kriterija.
<b>5. Analizirati rezultate vrednovanja i provjeriti konzistentnost koraka 1. – 4. za svaki koncept</b>	Usporediti dobrotu prema svakom od kriterija vrednovanja i za svaki koncept pojedinačno.
<b>6. Donijeti odluku o konceptu za daljnju razradu</b>	Konačna odluka o konceptu donosi se na temelju rezultata rangiranja.

### 4.3. Kriteriji ekološke prihvatljivosti predložene metode

Predloženom su metodom predviđeni sljedeći kriteriji ekološke prihvatljivosti:

1. ekoefektivnost pretvorbi energije i signala u tehničkom procesu,
2. broj pretvorbi energije i signala u tehničkom procesu,
3. ekološka prihvatljivost sekundarnih efekata na okoliš,
4. broj sekundarnih efekata na okoliš,
5. broj promjena agregatnog stanja materijala u tehničkom procesu.

Pahl i drugi [72] navode smjernice za razvoj ekološki i glede smanjenja troškova prihvatljivijih proizvoda. Za razvoj konceptijskih rješenja proizvoda važne su dvije smjernice

za razvoj ekološki prihvatljivih (i što se tiče troškova prihvatljivih) rješenja u konceptualnoj fazi koje su predložili Pahl i drugi [72], a to su izbjegavati promjenu oblika energije i agregatnog stanja materijala pri definiranju funkcija proizvoda. U literaturi nisu pronađeni slučajevi u kojima su navedeni kriteriji formalizirani u obliku kriterija ekološke prihvatljivosti proizvoda i primijenjeni u konceptualnoj fazi procesa konstruiranja pri vrednovanju ekološke prihvatljivosti konceptijskih rješenja. Pahl i drugi [72] također predlažu razmatranje alternativnih fizikalnih efekata i radnih principa za ostvarivanje funkcija proizvoda.

Predloženi kriteriji vrednovanja ekološke prihvatljivosti omogućuju vrednovanje na temelju značajki transformacija operanada tehničkoga procesa (prema [66]), odnosno uspoređivanjem zahtjeva ekološke prihvatljivosti sa značajkama svojstvenima tehničkom sustavu.

Kako bi se definirali kriteriji ekološke prihvatljivosti koji se tiču transformacija energije, materijala i informacija propisanih tehničkim procesom kojim se isporučuju željeni fizikalni efekti, definirani su kriteriji sukladno radu Pahla i drugih [72], u kojem su kriteriji za vrednovanje transformacija energije i informacija razmatrani zasebno od kriterija za vrednovanje transformacija u tehničkom procesu.

#### 4.3.1. Ekoefektivnost pretvorbi energije i signala

Radi definiranja kriterija prema kojemu bi se mogle vrednovati promjene oblika energije opisane tehničkim procesom transformacije i implicitno funkcijama tehničkih sustava, prvo se pristupilo razmatranju definicije kvalitete energije. Metode procjene eksergije i emergije sustava opisuju energiju koju sustav razmjenjuje s okolišem na način da je moguće i kvalitativno opisati odnos sustav – okoliš.

Prema popularnoj definiciji, energija je sposobnost nekog tijela ili mase da obavi rad [306]. U termodinamici, eksergija nekog sustava označuje maksimalni korisni rad otvorenog sustava koji se može postići tijekom procesa koji taj sustav dovodi u ravnotežu s nekim toplinskim spremnikom, u pravilu, okolišem. Za razliku od energije, eksergija je potrošena energija u procesu pretvorbe, zbog čega dolazi do generiranja entropije. Eksergija  $E_x$  može se izraziti preko entropije  $\Delta S$  te vrijedi jednačina (4) [307]:

$$\delta E_x = T_o \sum \Delta S \quad [\text{J}], \quad (4)$$

gdje je  $T_o$  temperatura okoliša. Eksergija se rabi pri analizi procesa u industriji, procjeni potrošnje resursa i materijala te u procjeni utjecaja na okoliš.

Coatanéa [252] i Medyna [253] koriste se eksergijom kao termodinamičkom značajkom energije kako bi opisali proizvode kao sustave koji uzrokuju utjecaje na okoliš zbog neminovnog povećanja entropije. Metodologije koje primjenjuju eksergiju u svrhu procjene utjecaja na okoliš ne razlikuju između kvalitete različitih oblika energije (kinetičke, mehaničke, nuklearne, solarne itd.) te obnovljivih ili neobnovljivih vrsta energije. Pritom je pretvorba energije iz jednog oblika u drugi regulirana prvim zakonom termodinamike o očuvanju i neuništivosti energije u termodinamičkim i ostalim procesima pretvorbe energije.

S druge strane, energija je sva energija koja je potrošena za dobivanje pojedinog resursa [243]. Primjerice, energija fosilnih goriva uključuje i energiju Sunca koja je bila potrebna za nastanak fosilnih goriva. Analiza energije kao metoda energijske analize sustava služi za usporedbu dvaju ili više sustava uzimajući u obzir energiju koja se upotrebljuje ne samo u razmatranom procesu nego i energiju koja je bila potrebna za nastanak energije koja posredno sudjeluje u procesu pretvorbe. Odum [70] je definirao energiju kao količinu solarne energije potrebnu za proizvodnju energije, proizvoda ili usluge. Što je veća energija potrebna za proizvodnju i održanje određene energije, proizvoda ili usluga, to je veći utjecaj na okoliš [243].

Analiza energije nekog općenitog sustava [308] obuhvaća procjenu djelovanja ekosustava, djelovanja čovjeka i njegovih aktivnosti i energije potrošene na održavanje sustava. Analiza energije sustava služi za određivanje pokazatelja održivosti nekog geografski određenog područja, a primjena te metode nije uobičajena tijekom razvoja ekološki prihvatljivih proizvoda [256]. U jednadžbi (5) solarna energija određenog oblika energije ( $E_m$ ) izražena je kao produkt eksergije ( $E_x$ ) i faktora solarne transformabilnosti oblika energije  $f_{TR}$  [308].

$$E_m = E_x * f_{TR} \quad [\text{seJ}] \quad (5)$$

Kako bi se osigurala usporedivost sustava analiziranih metodom analize energije sustava, razvijeni su faktori pretvorbe oblika energije u jedinice solarne energije, tzv. faktori transformabilnosti oblika energije [243]. Za potrebe definiranja kriterija ekološke prihvatljivosti koji bi se odnosio na vrednovanje ekološke prihvatljivosti pretvorbi energije iz jednog oblika u drugi, u prikazanom su istraživanju primijenjeni faktori pretvorbe oblika energije u jedinice solarne energije [70]. Faktor pretvorbe oblika energije jest količina solarne energije potrebne da zamijeni 1 džul korisne energije drugog oblika energije. Tablica 4.4. prikazuje faktore transformabilnosti oblika energije metode analize energije energetskih

sustava. Faktori pretvorbe oblika energije u jedinicama solarne energije mogu se naći u literaturi [70], [243] i [309].

**Tablica 4.4.** *Primjeri faktora pretvorbe oblika energije (transformabilnosti) [70], [243], i ekvivalentne solarne jedinice energije [309]*

Br.	Oblik energije → (faktor solarne transformabilnosti oblika energije, $seJ/J$ )	Ekvivalentni oblici energije kriterija vrednovanja ekotransformabilnosti oblika energije
1.	energija Sunca (solarna energija, svjetlosna energija, energija ultraljubičastog zračenja Sunca) → (1)	solarna energija
2.	latentna toplinska energija → (12,5)	latentna toplinska energija
3.	prosječna kinetička energija vjetra → (620)	latentna kinetička energija
4.	energija fotosinteze (toplinska i kemijska energija, raspršena, niske kvalitete i energetske efikasnosti) → (900)	latentna kemijska energija, svjetlosna energija
5.	energija vjetra → (2450)	kinetička energija
6.	energija iz heterogenih organskih materijala → (4400)	energija iz heterogenih organskih materijala
7.	geotermalna i vulkanska toplina → (12000)	toplinska energija
8.	kemijska energija (energija zbog razlika u $pH$ -vrijednostima u rijekama i kiši) → (15000)	kemijska energija
9.	mehanička energija → (29000)	mehanička energija
10.	potencijalna energija rijeka → (47000)	potencijalna energija
11.	Energija valova → (51000)	energija valova (ultrazvučnih valova, ...)
12.	energija goriva → (24000 - 200000), npr. drvo → (11000), ugljen → (40000), prirodni plin → (48000), nafta → (54000), etanol → (60000), benzin → (66000)	energija goriva
		energija iz homogenih anorganskih materijala
13.	energija plime i oseke (zbroj energije potencijalne energije oceana, topline Zemljine kore, solarne energije emitirane prema oceanu i energije plime i oseke) → (74000)	-
14.	prosječna kemijska energija u rijekama → (81000)	-
15.	elektromagnetska energija	elektromagnetska energija
16.	električna energija → (173000)	električna energija
17.	nuklearna energija → (200000)	nuklearna energija
18.	prosječna energija rijeka → (400000) energija morskih struja → (18400000)	-
20.	energija u homogenim anorganskim materijalima (proteini) → (1000000000)	biološka energija
21.	ljudska snaga, usluge → (80000 - 5000000000)	ljudska snaga, usluge
22.	informacije → (10000 - 100000000000000)	signal, informacije



**Tablica 4.5.** Faktori za pretvorbu oblika energije u jedinice solarne energije [70], [311]

Oznaka	Oblik energije	$f_{TR}$ (seJ/J) – faktor solarne transformabilnosti oblika energije	$f_{TR}$ (seJ/J), logaritamsko mjerilo	Kvaliteta energije
$E_{So}$	solarna	1	0	niska
$E_{LH}$	latentna toplinska	12	1,08	
$E_W$	energija vjetra, latentna kinetička	620	2,79	
$E_{LCh}$	latentna kemijska, energija fotona, svjetlosna	900	2,95	
$E_{HeO}$	energija heterogenih organskih materijala	4400	3,64	
$E_H$	toplinska energija	12000	4,08	
$E_{Ch}$	kemijska energija	15000	4,18	
$E_{WT}$	energija valova, plime i oseke	19000	4,28	
$E_{Me}$	mehanička energija	29000	4,46	
$E_F$	energija goriva	38000	4,58	
$E_P$	potencijalna energija	47000	4,67	
$E_K$	kinetička energija	55000	4,74	
$E_{HoO}$	energija homogenih organskih materijala	90000	4,95	
$E_A$	energija anorganskih materijala	110000	5,04	
$E_{EM}$	elektromagnetska energija	140000	5,15	
$E_E$	električna energija	170000	5,23	
$E_N$	nuklearna energija	200000	5,30	
$E_B$	biološka energija	1000000000	7,00	
$E_{Hu}$	ljudska snaga, usluge	2500000000	9,40	↓
$E_I$	informacija, signal	500000000000	12,70	visoka

Prema principu maksimiranja snage [310], pretvorbe kojima se maksimizira tok korisne energije energijski su efikasnije i povoljnije pretvorbe [308]. Pretvorbe oblika energije koje su, prema Odumovoj hijerarhiji oblika energije [70], niže kvalitete te se pretvorbom generiraju oblici energije više kvalitete ekološki su prihvatljivije pretvorbe. To je stoga što je riječ o pretvorbama energija niže energije u više, čime se potencijalno ostvaruje i više korisnog rada, odnosno potrošnja resursa je manja nego ako je riječ o pretvorbi oblika energije više kvalitete u oblik energije niže kvalitete. Tablica 4.5. prikazuje oblike energije i pripadajuće faktore solarne transformabilnosti. Faktori transformabilnosti oblika energije primjenjuju se pri analizi energije sustava [243].

Vrednovanje ekološke prihvatljivosti pretvorbi oblika energije temelji se na izračunavanju faktora ekoeftivnosti pretvorbe. Ekoeftivnost pretvorbe jest kvocijent faktora solarne transformabilnosti izlaznog oblika energije i faktora solarne transformabilnosti oblika energije (koji mogu biti energija, materijal ili signal).

$$\epsilon_{TR} = \frac{f_{TRO}}{f_{TRI}} \quad (6)$$

U jednadžbi (6)  $\epsilon_{TR}$  je ekoeftivnost pretvorbe (transformabilnost) procesa pretvorbe energije.  $f_{TRO}$  je faktor transformabilnosti pretvorbe izlaznog oblika energije.  $f_{TRI}$  je faktor transformabilnosti pretvorbe oblika energije, materijala ili informacije (signala) koja je transformirana u drugi (željeni) oblik energije. Ekoeftivnost pretvorbe (transformacije) jednog oblika energije u drugi definirana je u ovom istraživanju radi vrednovanja na temelju kriterija koji govori o ekološkoj prihvatljivosti pretvorbi energije iz jednog oblika u drugi. Vrijednosti za izračun izvedene su iz faktora transformabilnosti oblika energije.

Potrebno je naglasiti da se kriterij ekoeftivnosti pretvorbi oblika energije i signala odnosi na kvalitetu pretvorbe energije s obzirom na solarnu transformabilnost izraženu u jedinicama solarne energije, a ne na energetske efikasnost pretvorbi energije [312]. Ekoeftivnost pretvorbi energije kako je definirana u istraživanju prikazanom u ovoj disertaciji, odnosi se na kvalitetu energije i ovisi o tzv. *smjeru* pretvorbe te o razini kvalitete ulaznog i izlaznog oblika energije transformacijskog procesa opisanog faktorom transformabilnosti oblika energije (tablica 4.5.). Kvaliteta pojedinog oblika energije razmatra se s obzirom na faktor transformabilnosti oblika energije izražen u jedinicama solarne energije.

Tablica 4.6. sadržava podatke o kombinacijama ulazno-izlaznih koeficijenata oblika energije. Koeficijenti, tj. teorijska ekoeftivnost pretvorbe ulaznog oblika energije u izlazni oblik, definirani su na temelju jednadžbi (6) i (7). Ti koeficijenti izraženi su kao logaritmi vrijednosti radi lakšeg izračuna sume ekoeftivnosti pretvorbi energije i signala u slučaju većeg broja koncepata za usporedbu i vrednovanje. Jednadžba (7) prikazuje teorijsku ekoeftivnost pretvorbi energije i signala:

$$\epsilon_{TR} = \log(f_{TRO}) - \log(f_{TRI}), \quad (7)$$

gdje su  $\epsilon_{TR}$  ekoeftivnost pretvorbe energije (transformabilnost),  $f_{TRO}$  faktor transformabilnosti pretvorbe izlaznog oblika energije, a  $f_{TRI}$  faktor transformabilnosti pretvorbe ulaznog oblika energije.

**Tablica 4.6.** *Teorijska ekoefektivnost transformabilnosti oblika energije (oznake: tablica 4.5.)*

$TR_0$ – teorijska ekoefektivnost pretvorbi energije i signala izlaznog oblika energije ↓																			
$E_{So}$	$E_{LH}$	$E_W$	$E_{LCh}$	$E_{HeO}$	$E_H$	$E_{Ch}$	$E_{WT}$	$E_{Me}$	$E_F$	$E_P$	$E_K$	$E_{HoO}$	$E_A$	$E_{EM}$	$E_E$	$E_N$	$E_B$	$E_{Se}$	$E_I$
0	1,08	2,79	2,95	3,64	4,08	4,18	4,28	4,46	4,58	4,67	4,74	4,95	5,04	5,15	5,23	5,3	7	9,4	12,7
-1,08	0	1,71	1,88	2,56	3	3,1	3,2	3,38	3,5	3,59	3,66	3,88	3,96	4,07	4,15	4,22	5,92	8,32	11,62
-2,79	-1,71	0	0,16	0,85	1,29	1,38	1,49	1,67	1,79	1,88	1,95	2,16	2,25	2,35	2,44	2,51	4,21	6,61	9,91
-2,95	-1,88	-0,16	0	0,69	1,12	1,22	1,32	1,51	1,63	1,72	1,79	2	2,09	2,19	2,28	2,35	4,05	6,44	9,74
-3,64	-2,56	-0,85	-0,69	0	0,44	0,53	0,64	0,82	0,94	1,03	1,1	1,31	1,4	1,5	1,59	1,66	3,36	5,75	9,06
-4,08	-3	-1,29	-1,12	-0,44	0	0,1	0,2	0,38	0,5	0,59	0,66	0,88	0,96	1,07	1,15	1,22	2,92	5,32	8,62
-4,18	-3,1	-1,38	-1,22	-0,53	-0,1	0	0,1	0,29	0,4	0,5	0,56	0,78	0,87	0,97	1,05	1,12	2,82	5,22	8,52
-4,28	-3,2	-1,49	-1,32	-0,64	-0,2	-0,1	0	0,18	0,3	0,39	0,46	0,68	0,76	0,87	0,95	1,02	2,72	5,12	8,42
-4,46	-3,38	-1,67	-1,51	-0,82	-0,38	-0,29	-0,18	0	0,12	0,21	0,28	0,49	0,58	0,68	0,77	0,84	2,54	4,94	8,24
-4,58	-3,5	-1,79	-1,63	-0,94	-0,5	-0,4	-0,3	-0,12	0	0,09	0,16	0,37	0,46	0,57	0,65	0,72	2,42	4,82	8,12
-4,67	-3,59	-1,88	-1,72	-1,03	-0,59	-0,5	-0,39	-0,21	-0,09	0	0,07	0,28	0,37	0,47	0,56	0,63	2,33	4,73	8,03
-4,74	-3,66	-1,95	-1,79	-1,1	-0,66	-0,56	-0,46	-0,28	-0,16	-0,07	0	0,21	0,3	0,41	0,49	0,56	2,26	4,66	7,96
-4,95	-3,88	-2,16	-2	-1,31	-0,88	-0,78	-0,68	-0,49	-0,37	-0,28	-0,21	0	0,09	0,19	0,28	0,35	2,05	4,44	7,74
-5,04	-3,96	-2,25	-2,09	-1,4	-0,96	-0,87	-0,76	-0,58	-0,46	-0,37	-0,3	-0,09	0	0,1	0,19	0,26	1,96	4,36	7,66
-5,15	-4,07	-2,35	-2,19	-1,5	-1,07	-0,97	-0,87	-0,68	-0,57	-0,47	-0,41	-0,19	-0,1	0	0,08	0,15	1,85	4,25	7,55
-5,23	-4,15	-2,44	-2,28	-1,59	-1,15	-1,05	-0,95	-0,77	-0,65	-0,56	-0,49	-0,28	-0,19	-0,08	0	0,07	1,77	4,17	7,47
-5,3	-4,22	-2,51	-2,35	-1,66	-1,22	-1,12	-1,02	-0,84	-0,72	-0,63	-0,56	-0,35	-0,26	-0,15	-0,07	0	1,7	4,1	7,4
-7	-5,92	-4,21	-4,05	-3,36	-2,92	-2,82	-2,72	-2,54	-2,42	-2,33	-2,26	-2,05	-1,96	-1,85	-1,77	-1,7	0	2,4	5,7
-9,4	-8,32	-6,61	-6,44	-5,75	-5,32	-5,22	-5,12	-4,94	-4,82	-4,73	-4,66	-4,44	-4,36	-4,25	-4,17	-4,1	-2,4	0	3,3
12,7	-11,62	-9,91	-9,74	-9,06	-8,62	-8,52	-8,42	-8,24	-8,12	-8,03	-7,96	-7,74	-7,66	-7,55	-7,47	-7,4	-5,7	-3,3	0

$TR_I$ – teorijska ekoefektivnost pretvorbi energije i signala ulaznog oblika energije ↑																			

Iznosi parcijalnih solarnih efektivnosti sumiraju se kako bi se dobio ukupan zbroj solarnih ekoefektivnosti pretvorbi energija konceptijskoga rješenja. Time se omogućuje usporedivost konceptijskih rješenja prema kriteriju ekoefektivnosti pretvorbi energije i signala.

$$S_{\epsilon_{TRk}}(A_i) = \sum_{j=0}^{j=k} \epsilon_{TRk}(A_i) \quad (8)$$

U jednadžbi (8)  $S_{\epsilon_{TR}}$  je suma ekoefektivnosti pretvorbi oblika energije iz jednog oblika u drugi ( $\epsilon_{TR}$ ), gdje je  $k$  ukupni broj pretvorbi oblika energije koncepta  $A_i$ . Vrednovanje se provodi na temelju modela za agregiranja parcijalnih ekoefektivnosti (solarnih transformabilnosti) koncepta naziva aditivna vrijednosna funkcija (eng. *additive value function*) [313]. Za primjenu tog modela nužna je pretpostavka da su pretvorbe energije, materijala i signala, odnosno vrijednosti dobrote (ekoefektivnosti) koje ih opisuju, međusobno neovisne (tj. nisu uvjetovane redoslijedom, vrstom ili izostankom pretvorbi). Ta je pretpostavka primjenjiva u ovom slučaju jer zadovoljava uvjet da model agregiranja bude primjenjiv za najrazličitije lance efekata i kombinacije pretvorbi energije, materijala i signala.

Rezultat aditivne vrijednosne funkcije lako je interpretirati u slučaju usporedbe dvaju ili više rezultata. Radi efikasnijeg izračuna, faktori transformabilnosti izraženi su kao logaritamska vrijednost. To omogućuje zbrajanje i oduzimanje faktora transformabilnosti oblika energije, što su jednostavnije matematičke operacije nego u slučaju originalnih faktora transformabilnosti u tisućama solarnih jedinica energije po 1 džulu korisne energije.

#### 4.3.2. Broj pretvorbi energije i signala

Gilchrist i drugi [35] proučavali su kako funkcije, tjekovi materijala i energije proizvoda utječu na utjecaje proizvoda na okoliš. Proizvode su analizirali na temelju funkcijskih modela, provjeravajući hipotezu da je razvoj ekološki prihvatljivih proizvoda moguć na razini modeliranja funkcija. Pokušali su dovesti u vezu utjecaje na okoliš komercijalnih proizvoda i funkcija proizvoda predloženih modelom funkcija. Pritom su utjecaji na okoliš odabrani kao pokazatelj ekološke prihvatljivosti (održivosti) proizvoda.

Proizvodi koje su Gilchrist i drugi [35] okarakterizirali kao inovativne, uzrokuju veći utjecaj na okoliš u usporedbi s arhetipskim varijantama istih proizvoda. Veći utjecaji na okoliš inovativnih proizvoda od arhetipskih inačica istoga proizvoda Gilchrist i drugi [35] pripisuju nekonzistentnom unošenju podataka o proizvodima u *Design Repository* [208], varijabilnošću podataka, subjektivnoj interpretaciji značajki proizvoda ili objašnjavaju da su inovativni

proizvodi kompleksniji glede funkcija koje ostvaruju od arhetipskih inačica istoga proizvoda. Veći broj funkcija može uvjetovati veći broj komponenata u slučaju inovativnih proizvoda, čime se objašnjavaju i veći utjecaji na okoliš inovativnih proizvoda [199].

Kriterij broja pretvorbi energije i signala odabran je kao kriterij vrednovanja ekološke prihvatljivosti jer upućuje na razinu kompleksnosti koncepta. Veći broj pretvorbi ujedno upućuje na veći broj komponenata proizvoda te sukladno tomu, veće utjecaje na okoliš. U ovom istraživanju optimalni koncepti jesu ekološki prihvatljivi koncepti rangirani relativno visoko s obzirom na druge koncepte u skupu razmatranih konceptata. Optimalni su koncepti vrednovani relativno visoko s obzirom na oba kriterija, tj. kriterij broja pretvorbi energije i signala i kriterij ekoefektivnosti pretvorbi energije i signala.

#### 4.3.3. Ekološka prihvatljivost sekundarnih efekata na okoliš

Prema teoriji tehničkih sustava [64], tehnički je sustav jedan od konstitutivnih elemenata transformacijskog sustava. Konstruktori definiraju transformacije energije, materijala i signala i tehnički proces koji su potpomognuti određenom tehnologijom. Neki sekundarni efekti na okoliš mogu se predvidjeti na temelju razmatranja tehničkoga procesa i razmatranja koje fizikalne efekte tehnički sustav treba isporučiti tehničkom procesu. Sekundarni (latentni) efekti proizlaze, s jedne strane, iz definicije internih transformacija za isporuku efekata od tehničkog sustava, a, s druge strane, postoje i oni koji se mogu definirati na temelju tehničkog procesa i odabrane tehnologije [73].

Sekundarni (latentni) efekti na okoliš definiraju se na temelju ulaznih podataka o energiji, materijalima i signalima i mogu se odrediti na osnovi razmatranja lanaca efekata koji isporučuje tehnički sustav, a potrebni su za odigravanje tehničkog procesa. Transformacije energije, materijala i signala mogu se odrediti na temelju fizikalnih efekata, a oni se određuju preko fizikalnog, kemijskog ili biološkog zakona, relacije ili fenomena kojima su opisani [111]. Zbog toga se neki efekti na okoliš mogu predvidjeti. Za sekundarne efekte na okoliš koji se ne mogu predvidjeti u zadovoljavajućem vremenu i koristeći se resursima na raspolaganju, potrebno je provesti procjenu rizika. Sekundarni efekti na okoliš proizlaze iz (1) internih transformacija energije, materijala i signala koji su definirani za tehnički sustav i iz (2) tehničkog procesa kojim se ostvaruje svrha isporučivanja transformacija operanada do željenog (ciljanog) stanja.

Definiranje transformacija energije, materijala i signala te lanaca efekata važno je za definiranje tehničkog sustava u konceptualnoj fazi jer iz njih proizlaze principijelna rješenja

tehničkog sustava i zahtjevi za njegovo oblikovanje. Na osnovi principijelnih rješenja definiraju se organi i struktura proizvoda te oblikovne, geometrijske i dimenzijske značajke tehničkog sustava. Odabir i kombinacija fizikalnih efekata temelj su za razvoj originalnih i varijantnih konceptijskih rješenja tehničkih sustava. Koristeći se katalogima fizikalnih efekata [298], konstruktorima je omogućeno pretraživanje i inspiracija pri razvoju tehničkih sustava. Žavbi i drugi [314] pokazali su da se fizikalni efekti pohranjeni u bazi mogu iskoristiti pri generiranju novih koncepata i tehničkih rješenja proizvoda.

Kriterij ekološke prihvatljivosti sekundarnih efekata na okoliš temelji se na vrednovanju prema kategorijama iz strategija gospodarenja otpadom [315]. Radi se o listi opcija za gospodarenje otpadom te su definirane ekološki prihvatljive opcije. Provedena je stupnjevita podjela obilježja za ekološki neprihvatljive opcije prema razinama toksičnosti i predviđenim načinima gospodarenja otpadom [74], [75], [76]. Tablica 4.7. prikazuje smjernice za vrednovanje visoke, srednje i niske ekološke prihvatljivosti sekundarnih efekata na okoliš.

**Tablica 4.7.** Smjernice za vrednovanje ekološke prihvatljivosti sekundarnih efekata na okoliš [69]

<b>Visoka ekološka prihvatljivost sekundarnih efekata na okoliš</b>	<b>Srednja ekološka prihvatljivost sekundarnih efekata na okoliš</b>	<b>Niska ekološka prihvatljivost sekundarnih efekata na okoliš</b>
nema otpada / značajno malo otpada	recikliranje ostvarivo uz manje izmjene	oporaba bez dobivanja energije
biorazgradiv i biokompatibilan obnovljivi resurs	srednja biokompatibilnost i mogućnost kompostiranja	srednja biokompatibilnost i mogućnost kompostiranja
ponovna uporaba	moguće rabiti kao biogorivo	odlaganje / ispuštanje otpada srednje toksičnosti
reciklabilnost	oporaba je moguća u svrhu dobivanja energije	otpad visoke toksičnosti i opasni otpad

Tablica 4.8. definirana je prema smjernicama za vrednovanje ekološke prihvatljivosti sekundarnih (latentnih) efekata (tablica 4.7.) te sadržava podatke za ocjenjivanje ekološke prihvatljivosti sekundarnih efekata na okoliš. Ocjena se dodjeljuje na temelju vrijednosne ljestvice i značajki sekundarnih efekata na okoliš prema kojima je moguće dati ocjenu ekološke prihvatljivosti određenog izlaznog efekta. Svakom od izlaznih (sekundarnih) efekata na okoliš koji po vrsti mogu biti energija, materijal ili signal dodjeljuje se ocjena prema vrijednosnoj ljestvici (tablica 4.8.).

Ocjena ekološke prihvatljivosti sekundarnih efekata na okoliš koncepta određuje se prema jednadžbi:

$$S_{\epsilon_{EK}}(A_i) = \sum_{j=0}^{j=k} \epsilon_{EK_k}(A_i), \quad (9)$$

gdje je  $S_{\epsilon_{EK}}$  suma ocjena ekološke prihvatljivosti sekundarnih efekata na okoliš koncepta ( $\epsilon_{EK}$ ), a  $k$  je broj sekundarnih efekata na okoliš koncepta  $A$ .

**Tablica 4.8.** Vrijednosna ljestvica za ocjenjivanje dobrote sekundarnih efekata na okoliš

Ljestvica	Značajke ekološke prihvatljivosti sekundarnih efekata na okoliš
+10	nema otpada / emisija
+9	značajno malo otpada / emisija (mali utjecaji na okoliš)
+8	biorazgradiv i biokompatibilan obnovljivi resurs
+7	ponovna uporaba otpada / emisija (ili ostvarivo uz manje izmjene)
+6	reciklabilan
(+5)	-
+4	recikliranje (energije ili materijala) ostvarivo uz manje izmjene
+3	srednja biokompatibilnost i mogućnost kompostiranja otpada / emisija
+2	moguće rabiti kao biogorivo
+1	oporaba (energije ili materijala) ostvariva uz manje izmjene
(±0)	-
-1	oporaba bez povrata energije
-2	indirektno odlaganje / ispuštanje inertnog otpada/emisija niske toksičnosti
-3	direktno odlaganje / ispuštanje inertnog otpada/emisija niske toksičnosti
-4	odlaganje / ispuštanje otpada / emisija (znatan doprinos jednoj kategoriji utjecaja na okoliš)
(-5)	-
-6	indirektno odlaganje / ispuštanje otpada/emisija srednje toksičnosti
-7	direktno odlaganje / ispuštanje otpada/emisija srednje toksičnosti
-8	odlaganje/ispuštanje otpada / emisija (znatan doprinos više kategorija utjecaja na okoliš)
-9	odlaganje / ispuštanje otpada/emisija visoke toksičnosti
-10	direktno odlaganje / ispuštanje opasnog (visokotoksičnog/radioaktivnog) otpada / emisija

#### 4.3.4. Broj sekundarnih efekata na okoliš

Kriterij broja sekundarnih efekata na okoliš definiran je kao kriterij vrednovanja ekološke prihvatljivosti koncepata proizvoda jer daje informaciju o broju sekundarnih efekata na okoliš za koje je moguće odrediti ekološku prihvatljivost. Naime, koncept prema ekološkoj prihvatljivosti sekundarnih efekata na okoliš može biti visoko rangiran, no, ako je riječ o velikom broju (i različitih) latentnih efekata na okoliš, skupna ocjena ekološke prihvatljivosti koncepta bit će niža, odnosno u skladu s optimalnom.

#### 4.3.5. Broj promjena agregatnog stanja materijala u tehničkom procesu

Ovaj se kriterij temelji na broju promjena agregatnog stanja materijala u tehničkom procesu, a predložen je u obliku smjernice za razvoj ekološki i ekonomski prihvatljivih proizvoda [72]. Taj je kriterij predložen zato što pokazuje postoje li posebni zahtjevi oblika ili materijala komponenata te zahtjevi mehaničkih, toplinskih i drugih obilježja tehničkoga rješenja. Pretpostavka je da komponente koje sudjeluju u ostvarivanju funkcija koje propisuju mogućnosti tehničkog sustava da podrži ovakvu funkciju, trebaju podržati promjenu agregatnoga stanja bez promjene ili degradacije mehaničkih svojstava. Viši zahtjevi za materijalima ili oblikovanjem komponenata potencijalno znače i veće utjecaje na okoliš jer je više energije, materijala i/ili resursa potrebno za oblikovanje takvih komponenata i sklopova tehničkih sustava.

### **4.4. Procedura rangiranja koncepata**

Predloženom metodom višekriterijskoga vrednovanja ekološke prihvatljivosti konceptijskih rješenja tehničkih sustava propisuje se pet kriterija ekološke prihvatljivosti (ekoefektivnost pretvorbi energije i signala, broj pretvorbi energije i signala, ekološka prihvatljivost sekundarnih efekata na okoliš i njihov broj te broj promjena agregatnoga stanja materijala u tehničkom procesu). Procedura za vrednovanje ekološke prihvatljivosti uključuje nehijerarhijsko višekriterijsko vrednovanje i potom rangiranje s pomoću metode suma rangova [90].

Vrednovanje prema kriteriju ekoefektivnosti pretvorbi oblika energije i signala temelji se na zbroju ekoefektivnosti transformacija energije i signala u tehničkom procesu, a na temelju jednadžbe (8). Faktori transformabilnosti koji su mjera dobrote transformacija energije i signala izračunavaju se za transformacije koje se prikazuju u obliku lanaca fizikalnih efekata. Tablica 4.6. prikazuje kombinacije transformacija oblika energije i signala i ekoefektivnost tih transformacija. Prema kriteriju ekološke prihvatljivosti sekundarnih efekata na okoliš, svakom sekundarnom efektu dodjeljuju se bodovi (tablica 4.8.).

Vrednovanje prema kriteriju broja promjena oblika energije, materijala i informacija u tehničkom procesu temelji se na prebrojavanju transformacija koje opisuju pretvorbe oblika energije i signala te promjene fizikalnih ili kemijskih značajki materijala u tehničkom procesu. Vrednovanje prema kriteriju broja promjena agregatnog stanja materijala u tehničkom procesu provodi se prebrojavanjem transformacija pri kojima materijal u



tehničkome procesu mijenja agregatno stanje (isparivanje vode, sublimacija, topljenje leda itd.). Ekološki prihvatljivija rješenja identificiraju se vrednovanjem prema kriterijima maksimalne ekoefektivnosti pretvorbi oblika energije i signala i ekološke prihvatljivosti materijala te minimalnoga broja pretvorbi oblika energije i signala, broja sekundarnih efekata na okoliš i broja promjena agregatnoga stanja materijala.

Dobrota koncepata prema svakom od predloženih kriterija ekološke prihvatljivosti zapisuju se u matricu odlučivanja. Metodom sume rangova konceptima se dodjeljuje rang, prvo prema svakom kriteriju ekološke prihvatljivosti zasebno, a zatim se sumom rangova generiraju rangovi koncepata. Ako vrednovanje prema jednom ili više kriterija upućuje na dva ili više koncepata s jednakim rangom, rangiranje se provodi prema pravilu alternacije. Prema tom pravilu, niži se rang dodjeljuje konceptu koji je prema ostalim kriterijima najniže rangiran.

Primjena metode i kriterija vrednovanja ekološke prihvatljivosti demonstrirana je na dvama primjerima konceptijskih rješenja: konceptima pranja rublja iz studije slučaja [63] i konceptima stolnog sata budilice [50].

### **4.5. Primjena metode na primjeru koncepata pranja rublja**

Pregledom literature ustanovljen je nedostatak metoda namijenjenih vrednovanju ekološke prihvatljivosti koncepata koji su originalnog dizajna te su, slijedno tomu, definirani ciljevi istraživanja kojima se propisuje razvoj metode vrednovanja ekološke prihvatljivosti namijenjene konceptualnoj fazi i vrednovanju ekološke prihvatljivosti koncepata koji su originalnog dizajna. Metodologijom istraživanja propisana je validacija nove metode pa je stoga potrebno definirati reprezentativni skup koncepata na kojemu će se provesti ispitivanje efektivnosti i efikasnosti nove metode. Prvi reprezentativni skup koncepata jesu koncepti pranja rublja iz studije u kojoj su magistri inženjeri strojarstva imali zadatak rangirati pet koncepata pranja i čišćenja rublja prema ekološkoj prihvatljivosti [63].

U studiji slučaja koja je provedena u istraživanju opisanom u ovoj disertaciji, koncepti koje su ispitanici vrednovali prema ekološkoj prihvatljivosti implementiraju različite radne principe odstranjivanja nečistoća u svrhu ostvarivanja glavne funkcije pranja rublja i odstranjivanja nečistoća s tekstilnih tkanina. Studijom je potvrđeno da su koncepti koje su ispitanici analizirali prikladni kandidati za analizu problema vrednovanja ekološke prihvatljivosti koncepata proizvoda [81]. Koncept pranja rublja pjenom deterdženta i vode (slika 3.2.), koncept odstranjivanja nečistoća ultrazvukom (slika 3.3.), koncept suhog pranja

ugljikovim dioksidom (slika 3.4.) te koncept pranja rublja polimernim kuglicama (slika 3.5.) mogu se smatrati inovativnima zbog fizikalnih efekata koje isporučuju i principijelnih rješenja kojima su radni principi koncepata realizirani.

Primjena predložene metode u nastavku je opisana na primjeru vrednovanja koncepata pranja rublja. Opis primjene metode sadržava korake i upute za praktičnu primjenu metode.

Koncepti rangirani predloženom metodom:

1. koncept A – pranje praškastim deterdžentom i toplom vodom (60/90 °C),
2. koncept B – pranje pjenom deterdženta i toplom vodom (30 °C),
3. koncept C – ultrazvučno pranje tekućim deterdžentom i vodom,
4. koncept D<sup>a</sup> – čišćenje suhim ledom (sublimacijom ugljikova dioksida),
5. koncept E – pranje polimernim kuglicama, praškastim deterdžentom i vodom (30°C).

Primjena predložene metode započinje analizom koncepata (tablica 4.3.). Dodjeljivanje vrijednosti solarnih faktora transformabilnosti pretvorbama energije i signala te vrednovanje ekološke prihvatljivosti sekundarnih efekata na okoliš provode se s obzirom na definirane lance fizikalnih efekata i identificirane sekundarne efekte na okoliš. Koncepti mogu biti opisani nekim od formalnih načina zapisivanja funkcija, radnih principa, fizikalnih efekata i principijelnih rješenja, npr. definiranjem tehničkoga procesa [65], analizom funkcija [90] i funkcijskom dekompozicijom [72], morfološkom matricom [90] i principijelnim rješenjima [111].

Kako transformacije energije, materijala i signala te sekundarni efekti na okoliš koncepta uobičajeno nisu prethodno definirani ili očiti, konstruktori ih identificiraju tijekom generiranja lanaca fizikalnih efekata, pri čemu fizikalni efekti koncepta mogu biti opisani fizikalnim zakonima [111]. Svrha generiranja lanaca fizikalnih efekata jest identificiranje pretvorbi energije, materijala i signala te sekundarnih efekata na okoliš kako bi se moglo pristupiti vrednovanju prema pet kriterija ekološke prihvatljivosti predloženih ovim istraživanjem.

Postupak identifikacije pretvorbi energije, materijala i signala, zatim lanaca efekata i sekundarnih efekata na okoliš te dodjeljivanje vrijednosti ekološke prihvatljivosti sekundarnim efektima na okoliš može biti zahtjevan za konstruktora. Razina zahtjevnosti ovisi o tome jesi li dostupne informacije o konceptima i njihovim radnim principima te o

znanju konstruktora o fizikalnim efektima i principijelnim rješenjima koncepta. Ako te informacije o konceptima nisu dostupne, konstruktor ili tim konstruktora koji provode vrednovanje ekološke prihvatljivosti upućeni su provesti dodane analize konceptata kako bi potpuno razumjeli radne principe, način rada i tehnologiju, a time i mogli u sljedećem koraku identificirati lance fizikalnih efekata i sekundarne efekte na okoliš.

Vrednovanje prema kriteriju ekoefektivnosti pretvorbi energije i signala provodi se na temelju podataka o teorijskoj ekoefektivnosti pretvorbi (tablica 4.6.), a vrednovanje prema kriteriju ekološke prihvatljivosti sekundarnih efekata na okoliš na osnovu vrijednosne ljestvice dobrote tog kriterija (tablica 4.8.).

Primjena predložene metode može biti zahtjevna i glede vremena ako je riječ o velikom broju funkcija, fizikalnih efekata i njihovih lanaca te sekundarnih efekata na okoliš. Čak i kod najjednostavnijih proizvoda, fizikalni efekti koje ima isporučiti tehnički sustav ostvareni su interakcijom više različitih fizikalnih efekata i njihovih lanaca. Rihtaršić i drugi [316] preporučuju da se lanci efekata izdvoje i prikazuju odvojeno.

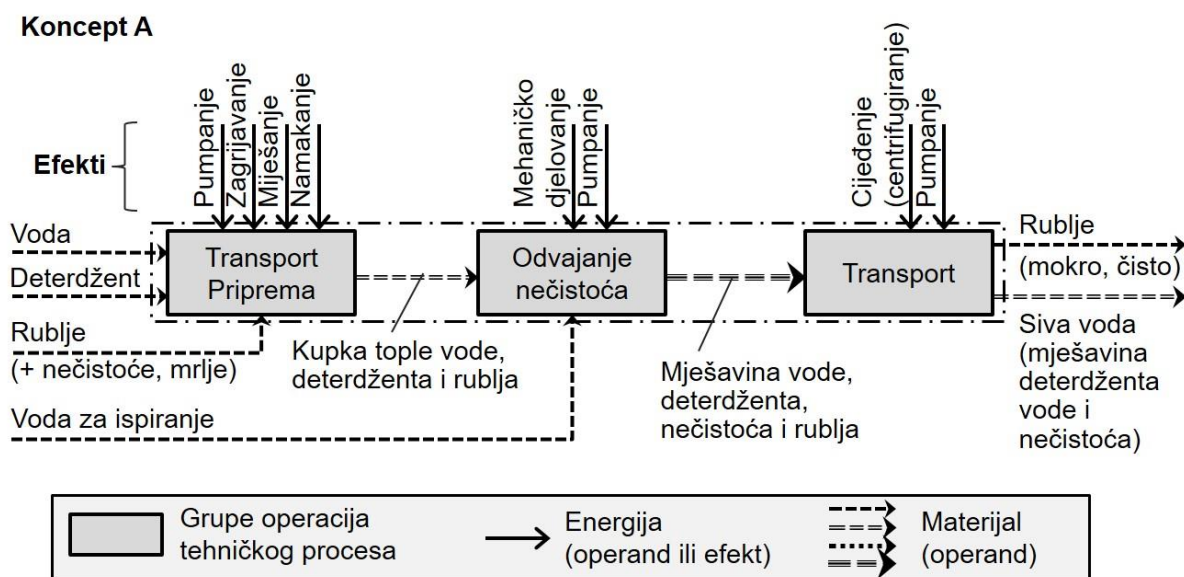
Pri definiranju sekundarnih efekata na okoliš uputno je voditi se preporukama Chakrabartija i Johnsona [317]. Kao što će biti pokazano na primjeru vrednovanja koncepta pranja rublja praškastim deterdžentom i toplom vodom, sekundarni efekti na okoliš definiraju se nakon što su definirani fizikalni efekti i principijelna rješenja konceptata. Kao pomoć pri analizi konceptata, a u svrhu identifikacije fizikalnih efekata i principijelnih rješenja, konstruktori se mogu koristiti metodama kao što su funkcijska dekompozicija i modeliranje funkcija s pomoću tijeka [72].

##### 4.5.1. Koncept pranja rublja A

Pranje rublja i odstranjivanje nečistoća ostvaruje se djelovanjem praškastog deterdženta za strojno pranje rublja i toplom vodom. Temperatura pranja može iznositi 60 ili 90 °C, ovisno o programu pranja. Pranje rublja ostvaruje se kombinacijom mehaničkog, kemijskog i toplinskog djelovanja na tekstil i nečistoće (slika 4.3.).

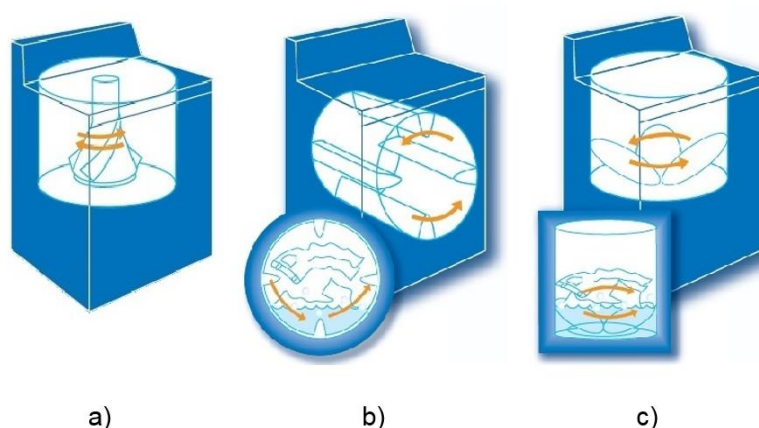
Pranje tekstila vodom, pogotovo odstranjivanje slabo topljivih nečistoća u vodi, kompleksan je proces koji se sastoji od više usporednih procesa u međusobnoj interakciji. Ti procesi jesu: namakanje tekstila i nečistoća, odstranjivanje čestica nečistoća, raspršivanje nečistoća, oksidacijsko odstranjivanje neželjenih obojenja na tekstilu itd. [283]. U procesu pranja tekstila u perilici rublja sudjeluju: tekstil (rublje), nečistoće koje treba odstraniti (krute

i tekuće nečistoće, prljavština, boje i mirisi), perilica rublja (tehnički sustav koji dostavlja fizikalne efekte potrebne za ostvarivanje tehničkoga procesa), voda i deterdžent.



**Slika 4.3.** Tehnički proces i fizikalni efekti procesa pranja rublja (koncept A)

Uloga je vode u procesu pranja tekstilnih tkanina sljedeća: voda služi kao otapalo deterdženta, sredstvo za natapanje (bubrenje) tekstila pri pranju, za prijenos (mehaničke) energije i ostvarivanje trenja između vlakana te kao sredstvo za sakupljanje i odvođenje nečistoća odstranjenih s vlakana. Slika 4.4. prikazuje različite izvedbe koncepta A: američki, europski i japanski koncept uređaja za strojno pranje rublja u kućanstvima.

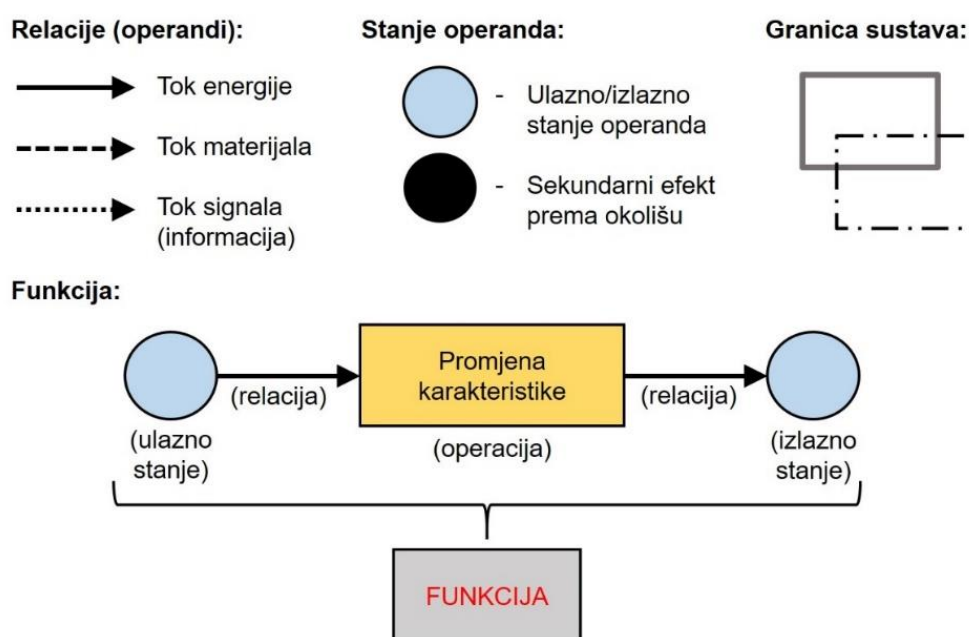


**Slika 4.4.** Prikaz koncepta američke (a), europske (b) i japanske (c) perilice za strojno pranje rublja u kućanstvima [318]

Prikaz tehničkoga procesa (slika 4.3.) konstruktorima omogućuje preliminarno identificiranje fizikalnih efekata koncepta. Za potpuni prikaz transformacija energije,

materijala i signala koje opisuju radni princip koncepta tehničkog sustava preporuka je koristiti se nekim od metoda analize funkcija proizvoda, primjerice metodom modeliranja funkcija proizvoda s pomoću tijeka ili metodom funkcijske dekompozicije [72].

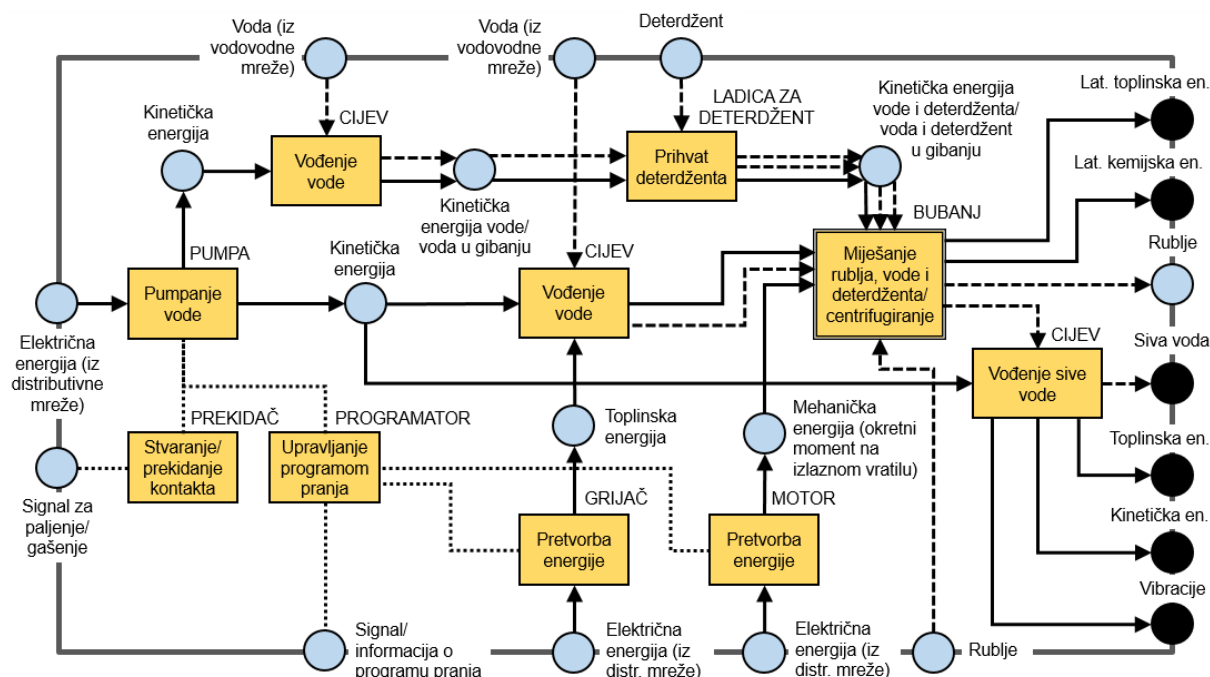
Modeliranje funkcija s pomoću tijeka podrazumijeva definiranje ulaznih i izlaznih stanja operanada (energije, materijala i signala), njihovih relacija i operacija koje zajedno čine funkcije proizvoda. Slika 4.5. prikazuje legendu oznaka operanada, relacija, granica sustava, funkcija i sekundarnih efekata na okoliš pri modeliranju funkcija s pomoću tijeka.



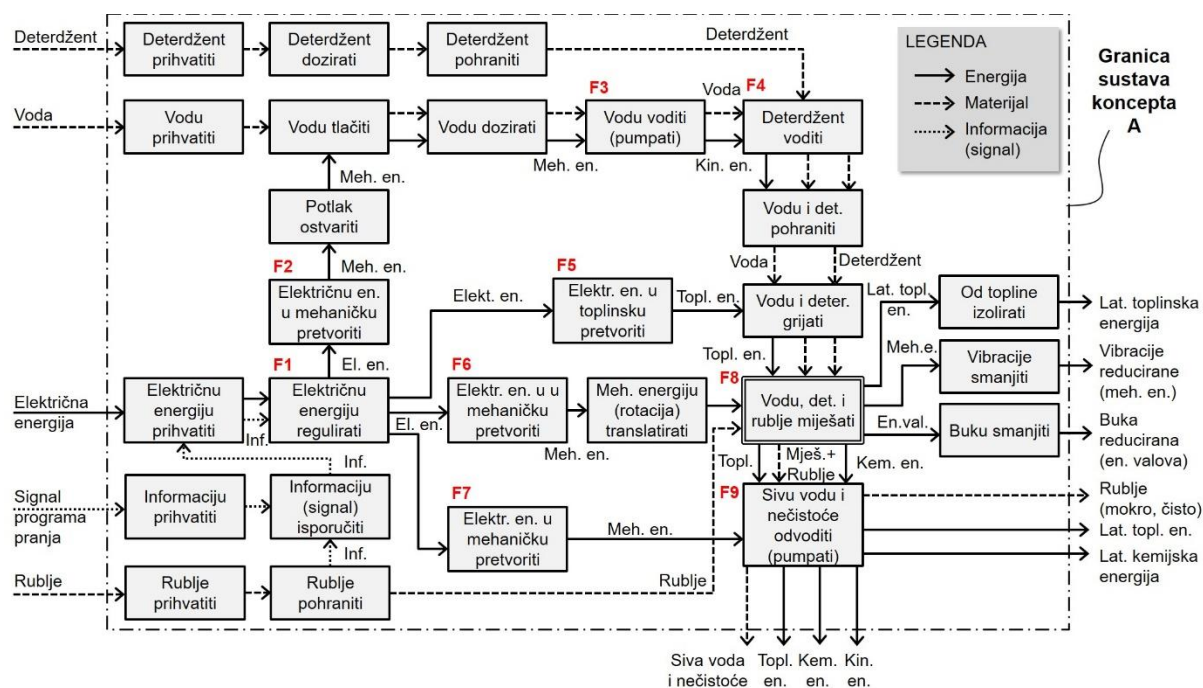
**Slika 4.5.** Oznake funkcija, operanada i sekundarnih efekata na okoliš u modelu funkcija s pomoću tijeka

Konstruktorima koji se prvi put susreću s predloženom metodom i analizom koncepata putem razmatranja radnih principa i fizikalnih efekata preporučuje se koristiti se metodom modeliranja funkcija s pomoću tijeka (slika 4.6.) ili metodom funkcijske dekompozicije (slika 4.7.). Primjenjujući metode analize funkcija, konstruktori mogu poboljšati razumijevanje fizikalnih efekata, lanaca fizikalnih efekata, transformacija energije, materijala i signala te sekundarnih efekata na okoliš koncepata koje valja vrednovati.

Funkcijska struktura koncepta A (slika 4.7.) generirana je na temelju analize funkcija automatske perilice rublja. Riječ je o konceptu pranja rublja praškastim deterdžentom za strojno pranje rublja i toplom vodom temperature 60 °C, odnosno 90 °C (ovisno o odabranom programu pranja) [319].



**Slika 4.6.** Model funkcija s pomoću tijeka koncepta pranja rublja praškastim deterdžentom i toplom vodom (60 °C/90 °C), (legenda: slika 4.5.)



**Slika 4.7.** Funkcijska struktura koncepta pranja rublja praškastim deterdžentom i toplom vodom (60 °C/90 °C)

Vrednovanje ekološke prihvatljivosti svakog koncepta zapisuje se u pomoćnoj tablici za vrednovanje ekološke prihvatljivosti koncepta.

Podatci o konceptu koji su nužni za vrednovanje ekološke prihvatljivosti koncepata predloženom metodom:

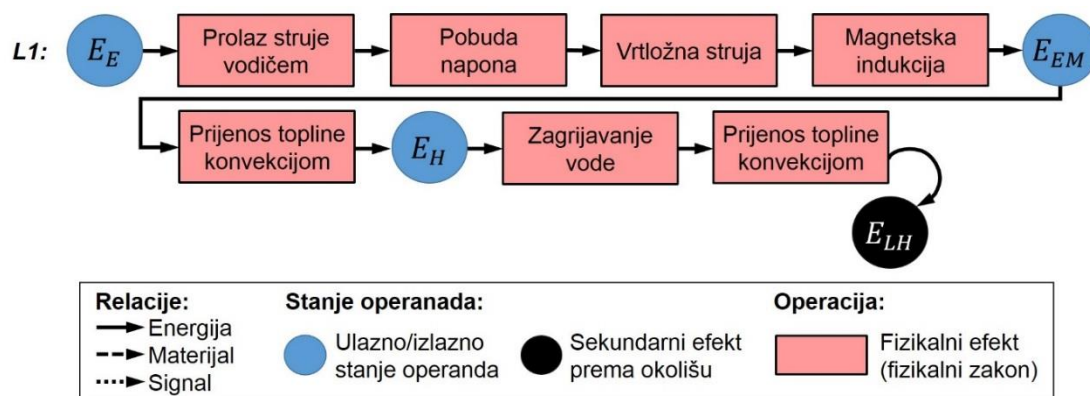
- lanci fizikalnih efekata s prikazom pretvorbi oblika energije i signala
- teorijske ekoefektivnosti i broj pretvorbi energije i signala u lancima efekata
- vrsta i broj sekundarnih efekata na okoliš
- parcijalne i ukupna ocjena ekološke prihvatljivosti efekata na okoliš
- broj sekundarnih efekata na okoliš
- broj promjena agregatnoga stanja materijala.

Lanci fizikalnih efekata prikazuju transformacije oblika energije, materijala i signala koje su nužne za ostvarivanje željenih fizikalnih efekata. Skup lanaca efekata naziva se radnim principom, a pritom fizikalni efekti mogu biti opisani fizikalnim zakonima. Fizikalni efekti, fizikalni zakoni i njihova principijelna rješenja mogu se naći u katalozima fizikalnih efekata [298] ili katalozima principijelnih rješenja. Katalozi fizikalnih efekata rabe se u svrhu inspiracije tijekom generiranja ideja, koncepata i razradi koncepata. Katalozi fizikalnih efekata konstruktorima mogu olakšati identifikaciju fizikalnih efekata i fizikalnih zakona koncepata koje analiziraju (npr. [320]).

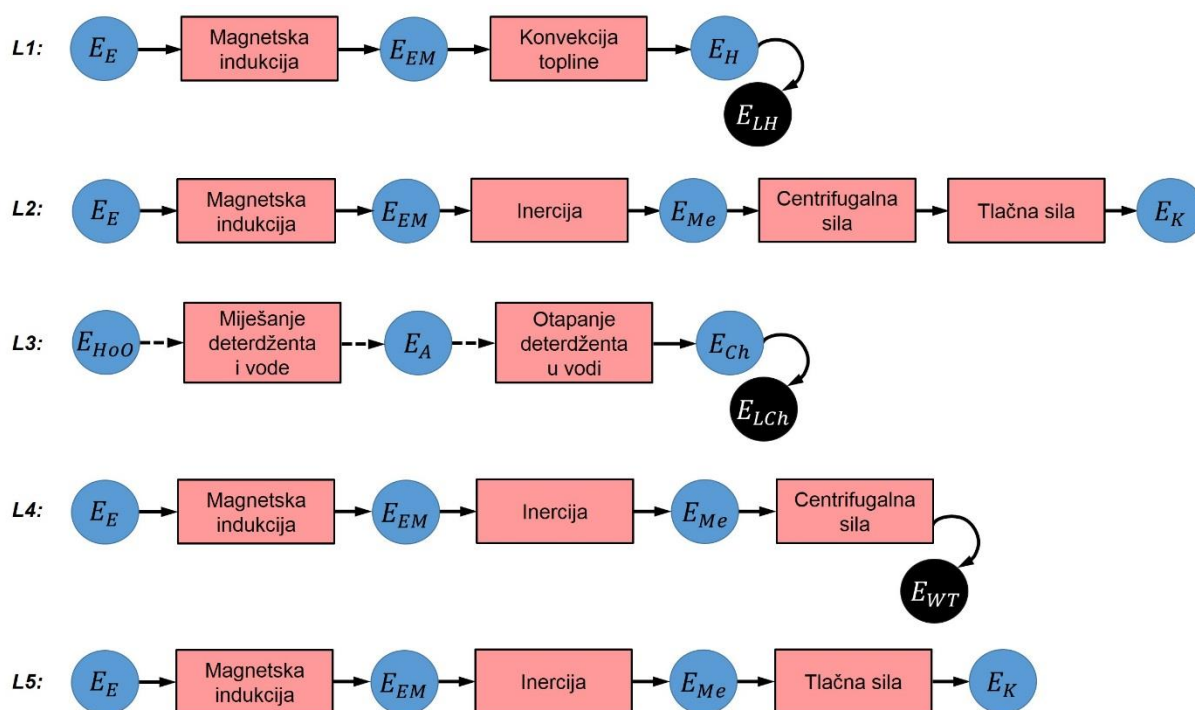
S obzirom na to da razina znanja konstruktora o tome kako se fizikalni efekti i njihovi lanci generiraju može varirati, preporučuje se generiranje lanaca fizikalnih efekata radi definiranja ključnih fizikalnih efekata skiciranjem tehničkoga procesa (slika 4.3.) te transformacija koje upućuju na promjenu oblika energije i signala, kao i promjenu fizikalnih ili kemijskih svojstava materijala u tehničkom procesu. Novostečeno znanje o transformacijama energije, materijala i signala konstruktori zatim mogu zapisati i analizirati koristeći se metodom modeliranja funkcija s pomoću tijeka (slika 4.6.) ili metodom funkcijske dekompozicije (slika 4.7.).

Slika 4.8. prikazuje lanac fizikalnih efekata koji se sastoji od niza nekoliko fizikalnih zakona kako bi se ostvarilo zagrijavanje vode za pranje rublja. Principijelno rješenje kojim se ostvaruje prijenos topline konvekcijom dobro je poznato, učinkovito i često primjenjivano rješenje električnog grijača vode.





Slika 4.8. Lanac fizikalnih efekata L1 (koncept pranja rublja A)



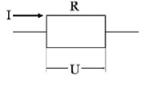
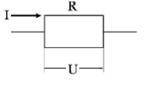
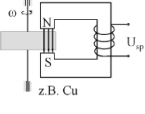
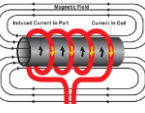
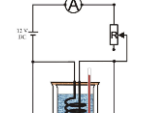
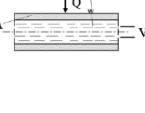
Slika 4.9. Lanci fizikalnih efekata koncepta pranja rublja A (legenda: slika 4.8.)

Slika 4.9. prikazuje lance fizikalnih efekata i sekundarne efekte na okoliš koncepta pranja rublja toplom vodom i praškastim deterdžentom (koncept A). Sekundarni efekti na okoliš mogu se identificirati kod svake transformacije energije, materijala ili signala te je za njihovo vrednovanje ekološke prihvatljivosti potrebno voditi se prvim zakonom termodinamike. Sekundarni efekti na okoliš jesu gubitci u okolišu koji nastaju zbog transformacija energije, materijala i signala.

Tablica 4.9. prikazuje razradu fizikalnih efekata, fizikalne zakone, ulazne i izlazne fizikalne veličine lanca fizikalnih efekata L1 koncepta pranja toplom vodom i deterdžentom.



**Tablica 4.9.** Razrada fizikalnih zakona lanca fizikalnih efekata L1 koncepta pranja rublja A

Br.	Fizikalni efekt	Grana fizike	Fizikalni zakon	Jednadžba	Opis	Fizikalne dimenzije	Oznaka	Jedinica	Ulazne fizikalne veličine	Izlazne fizikalne veličine	Slika
1.	Prolaz struje vodičem	Elektricitet	Ohmov zakon	$I = U / R$	Pad napona $U$ na električnom vodiču proporcionalan je jakosti električne struje koja njime protječe.				$U$	$I$	
					$U$ - napon električne struje (V)	Napon električne struje	$U$	V	$R$		
					$I$ - jakost električne struje (A)	Jakost električne struje	$I$	A			
					$R$ - otpor	Otpor	$R$	$\Omega$			
2.	Pobuda napona	Elektricitet	Ohmov zakon	$U = I \cdot R$	Pad napona $U$ na električnom vodiču proporcionalan je jakosti električne struje koja njime protječe.				$I$	$U$	
					$U$ - napon električne struje (V)	Napon električne struje	$U$	V	$R$		
					$I$ - jakost električne struje (A)	Jakost električne struje	$I$	A			
					$R$ - otpor	Otpor	$R$	$\Omega$			
3.	Vrtložna struja	Elektromagnetizam	Vrtložna struja	$U = kB \cdot (d\omega / dt)$	Inducirana struja u vodiču koji je izložen promjenjivom magnetskom polju. Pri tome se javlja magnetsko polje koje radi protiv glavnog magnetskog polja. Vrtložna struja uzrokuje zagrijavanje jezgre (grijača).	Napon električne struje	$U$	V	$U$	$\omega$	
					$U$ - napon električne struje (V)	Kutna brzina	$\omega$	1/s, Hz		$B$	
					$k$ - konstanta materijala (npr. bakar...)						
					$B$ - magnetska indukcija (T)						
					$\omega$ - kutna brzina (1/s, Hz)						
					$t$ - vrijeme (s)						
4.	Zagrijavanje indukcijom	Elektromagnetizam	Vrtložna struja	$Q = \text{const } B^2 \omega^2$ $\omega = 2\pi f$	U električnim vodičima koji se nalaze u promjenjivom magnetskom polju dolazi do zagrijavanja zbog pojave vrtložnih struja.	Vlasitita frekvencija	$f$	Hz	$B$	$Q$	
					$B$ - magnetska indukcija (T)	Magnetska indukcija	$B$	T	$\omega$		
					$\kappa$ - električna provodljivost (konduktivitet) (S/m)						
					$\omega$ - kutna brzina (1/s, Hz)						
					$f$ - frekvencija (Hz)						
5.	Jouleova toplina	Termodinamika	Jouleova toplina	$Q = I^2 \cdot R \cdot t$	U vodiču s čisto omskim otporom sva energija električne struje pretvori u toplinu. Brzina generiranja topline razmjerna je kvadratu jakosti struje.	Jakost električne struje	$I$	A	$I$	$Q$	
					$Q$ - Jouleova toplina (J)	Električni otpor	$R$	$\Omega$	$R$		
					$I$ - jakost električne struje (A)						
					$R$ - električni otpor ( $\Omega$ )						
					$t$ - vrijeme (s)						
6.	Zagrijavanje vode	Vođenje topline	Konvekcija	$Q = \alpha A(T_f T_d)$	Opisuje istovremenost makroskopskog i mikroskopskog prijenosa energije (toplina) kod fluida.	Toplina	$Q$	J	$Q$	$T_d$	
					$\alpha$ - koeficijent prijenosa topline (1/K)	Temperatura	$T$	K			
					$A$ - površina grijača ( $m^2$ )						
					$T_d$ - temperatura grijača (K)						
					$T_f$ - temperatura vode (K)						
					$Q$ - toplina zbog razlika temperature grijača i vode (J)						

Odluka o tome je li neki sekundarni efekt na okoliš potrebno uzeti u obzir pri vrednovanju ekološke prihvatljivosti koncepta donosi se na temelju znanja o konceptu, radnim principima i principijelnim rješenjima koncepta. Primjerice, ako sekundarni efekti na okoliš, kao što su vibracije i latentna toplina, zanemarivi po iznosu, odnosno utjecajima na konstrukciju ili okoliš, a nisu u interakciji s drugim fizikalnim efektima ili transformacijama, njihovu ekološku prihvatljivost nije potrebno vrednovati.

Iako je fizikalne efekte i sekundarne efekte na okoliš moguće identificirati na mikroskopskoj razini (fizikalni efekti kojima se opisuje međudjelovanje na razini atoma i

molekula), predložena je metoda namijenjena vrednovanju ekološke prihvatljivosti, pri čemu se uzimaju u obzir fizikalni efekti kojima se ostvaruju radni principi tehničkih sustava.

To je stoga što se vrednovanjem sekundarnih efekata, koji su po iznosu, utjecaju na razmatrani tehnički sustav i utjecaju na okoliš zanemarivo mali, nepotrebno produljuje proces vrednovanja predloženom metodom, a bez prednosti za generiranje rezultata vrednovanja ekološke prihvatljivosti koncepata i rangiranje koncepata. Preporuke konstruktorima o tome koje sekundarne efekte na okoliš uzeti u obzir, a koje zanemariti navedene su u radu Chakrabartija i Johnsona [317].

Pomoćna tablica za vrednovanje ekološke prihvatljivosti (npr. tablica 4.10.) omogućuje zapisivanje i praćenje operacija zbrajanja i prebrojavanja tijekom vrednovanja predloženom metodom. U pomoćnim se tablicama redom zapisuju o fizikalnim efektima, lancima fizikalnih efekata i sekundarnim efektima prema okolišu koncepta. Potom se u pomoćne tablice zapisuju teorijske eko-efektivnosti transformacija oblika energije i signala, broj pretvorbi energije i signala, parcijalne i ukupna ocjena ekološke prihvatljivosti sekundarnih efekata prema okolišu, broj sekundarnih efekata prema okolišu i broj promjena agregatnoga stanja materijala u tehničkom procesu koncepta.

Tablica 4.6. prikazuje faktore teorijske ekoefektivnosti pretvorbi ulaznog oblika energije ili signala u željeni izlazni oblik energije ili signala. Dodjeljivanje ocjena ekološke prihvatljivosti sekundarnim efektima na okoliš obavlja se prema smjernicama (tablica 4.8.).

Pretvorba električne energije u toplinsku energije (slika 4.7.: funkcija  $F5$ , slika 4.9.: lanac  $L1$ ) karakteristična je za koncept pranja rublja A, ali i za koncepte pranja rublja B i E jer voda kao nositelj toplinske energije sudjeluje u procesu pranja. Teorijska ekoefektivnost pretvorbe električne u toplinsku energiju negativnog je predznaka, što upućuje na ekološki nepovoljnu pretvorbu oblika energije.

U pomoćnoj tablici za vrednovanje koncepta pranja rublja A (tablica 4.10.), energija pohranjena u anorganskom materijalu ( $E_A$ ) odnosi se na energiju deterdženta koja se posredovanjem vode i topline pretvara u kemijsku energiju (slika 4.7.: funkcija  $F8$ , slika 4.9.: lanac  $L3$ ).

Za glavnu funkciju koncepta A (slika 4.7.: funkcija  $F8$ ) karakteristične su još pretvorba toplinske u latentnu toplinsku energiju, te pretvorba mehaničke energije u buku (vibracije). Teorijske ekoefektivnosti pretvorbi energija koje su potrebne za ostvarivanje glavne funkcije koncepta A (slika 4.7.: funkcija  $F8$ ) negativnog su predznaka, tj. ekološki neprihvatljive. Za

konstruktora, relevantan podatak o teorijskoj ekoefektivnosti pretvorbi koje su karakteristične za koncept je zbroj parcijalnih teorijskih ekoefektivnosti koncepta. Zbroj parcijalnih teorijskih ekoefektivnosti koncepta pranja rublja A iznosi -8,49 (tablica 4.10.).

**Tablica 4.10.** Pomoćna tablica za vrednovanje koncepta pranja rublja A

Oznaka	Lanac fizikalnih efekata – vrednovanje prema kriteriju ekoefektivnosti pretvorbi energije i signala	Dobrota (zbroj)
<i>L1</i>	$E_E \rightarrow E_{EM} = (-0,19); E_{EM} \rightarrow E_H = (-1,07); E_H \rightarrow E_{LH} = (-3,00).$	-4,26
<i>L2</i>	$E_E \rightarrow E_{EM} = (-0,19); E_{EM} \rightarrow E_{Me} = (-0,68); E_{Me} \rightarrow E_K = (0,28).$	-0,59
<i>L3</i>	$E_{HOO} \rightarrow E_A = (0,09); E_A \rightarrow E_{Ch} = (-0,87); E_{Ch} \rightarrow E_{LCh} = (-1,22).$	-2,00
<i>L4</i>	$E_E \rightarrow E_{EM} = (-0,19); E_{EM} \rightarrow E_{Me} = (-0,68); E_{Me} \rightarrow E_{WT} = (-0,18).$	-1,05
<i>L5</i>	$E_E \rightarrow E_{EM} = (-0,19); E_{EM} \rightarrow E_{Me} = (-0,68); E_{Me} \rightarrow E_K = (0,28).$	-0,59
<b>Ukupno:</b>	~12 transformacija < 0; ~3 transformacije > 0.	-8,49
Oznaka	Sekundarni efekti na okoliš – vrednovanje prema kriteriju ekološke prihvatljivosti sekundarnih efekata na okoliš	Dobrota
<i>S.Ef1</i> ( $E_H, E_{Ch}, E_K$ )	siva voda + nečistoće (toplinska, kemijska, kinetička) → odlaganje / ispuštanje otpada / emisija (znatan doprinos više kategorija utjecaja na okoliš) = (-8)	-8
<i>S.Ef2</i> ( $E_{LH}$ )	latentna toplinska energija → direktno odlaganje / ispuštanje inertnog otpada / emisija niske toksičnosti = (-3)	-3
<i>S.Ef3</i> ( $E_{Me}$ )	vibracije → znatno malo otpada / emisija (mali utjecaji na okoliš) = (+9)	+9
<i>S.Ef4</i> ( $E_{WT}$ )	buka → direktno odlaganje / ispuštanje inertnog otpada / emisija niske toksičnosti = (-3)	-3
<i>S.Ef5</i> ( $E_{LH}, E_{LCh}$ )	latentna toplinska, latentna kemijska energija (rublje) → indirektno odlaganje / ispuštanje inertnog otpada / emisija niske toksičnosti = (-2)	-2
<b>Ukupno:</b>	~5 sekundarnih efekata na okoliš (1 <i>S.Ef</i> > 0; 4 <i>S.Ef</i> < 0).	-7

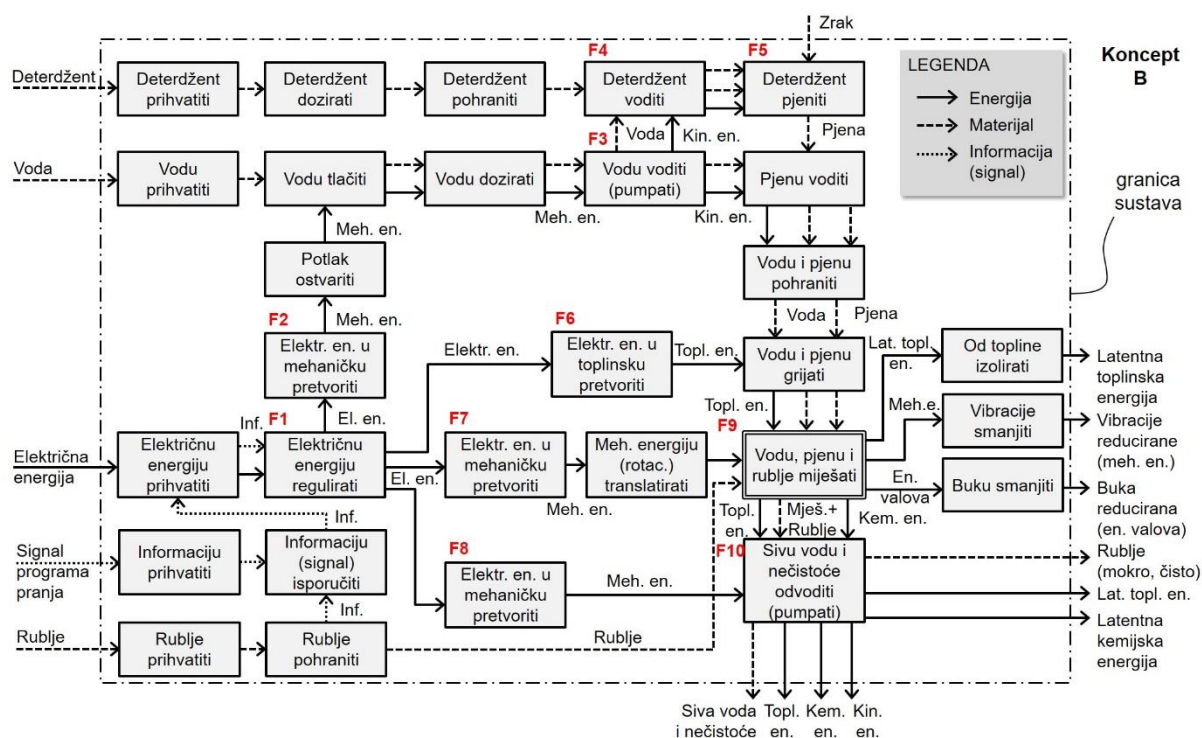
Oznake: *L1*, *L2*, ... *L5* – lanci fizikalnih efekata koncepta pranja rublja A (slika 4.9.), *S.Ef1*, *S.Ef2*, ... *S.Ef5* – sekundarni (latentni) efekti na okoliš (slika 4.7.), tablica 4.5.: oznake oblika energije i signala.

Vrednovanje prema kriteriju ekološke prihvatljivosti sekundarnih efekata na okoliš provodi se tako da se prvo definiraju sekundarni (latentni) efekti koncepta na okoliš, a potom se svakom efektu dodjeljuje ocjena na temelju smjernica za vrednovanje ekološke prihvatljivosti sekundarnih efekata na okoliš (tablica 4.8.). Latentna toplinska energija, vibracije i buka sekundarni su efekti na okoliš. Dio latentne toplinske i latentne kemijske energije zadržavaju se na rublju nakon odvajanja sive vode od čistog rublja. Latentna kemijska energija rublja vrednovana je kao posredno ispuštanje otpada i emisija niske toksičnosti u okoliš te je ovom, sekundarnom efektu na okoliš dodijeljena ocjena -2. U pomoćnoj tablici (tablica 4.10.) siva voda s nečistoćama ocijenjena je kao najmanje ekološki prihvatljiv efekt u usporedbi sa ostalim sekundarnim efektima na okoliš koncepta A. Za

konstruktora, relevantan podatak iz pomoćne tablice je zbroj parcijalnih ekoloških prihvatljivosti sekundarnih efekata na okoliš. Ukupna ekološka prihvatljivost sekundarnih efekata na okoliš koncepta pranja rublja A iznosi -7 (tablica 4.10.).

#### 4.5.2. Koncept pranja rublja B

Koncept B inačica je procesa strojnog pranja rublja toplom vodom i praškastim deterdžentom. Za razliku od procesa pranja koncepta A, rublje se namače pjenom deterdženta i vode (tehnologija *Eco Bubble™* [284]), a pranje se provodi na nižim temperaturama pranja (~30 °C). Kod obaju koncepata odstranjivanje nečistoća ostvaruje se u kupki vode i rublja.. Tehnički su procesi koncepata A i B istovjetni, osim u detalju što se kemijsko djelovanje deterdženta na rublje kod koncepta B ostvaruje pjenom deterdženta i vode. Pranje pjenom omogućuje brže prodiranje deterdženta među tekstilna vlakna, otapanje deterdženta u kupki i ispiranje deterdženta i nečistoća.



Slika 4.10. Funkcijska struktura koncepta pranja rublja B

Funkcijska struktura koncepta pranja rublja B (slika 4.10.) razlikuje od funkcijske strukture koncepta pranja rublja A u samo jednoj pretvorbi oblika energije (slika 4.10.: funkcija F5). Ukupna teorijska ekoefektivnost pretvorbi energija koncepta pranja rublja B veća je nego kod koncepta pranja rublja A za iznos teorijske ekoefektivnosti pretvorbe

unutarnje energije heterogenog materijala (zrak) u unutarnju energiju anorganskog materijala (pjena deterdženta).

Kod koncepta pranja rublja B pranje rublja obavlja se na nižim temperaturama nego kod koncepta pranja rublja A. Zbog toga je gubitak toplinske energije kod koncepta pranja rublja B manji nego kod koncepta pranja rublja A. Latentna toplinska energija koja neminovno nastaje zbog nepovratnosti procesa prelaska topline jest sekundarni efekt na okoliš (slika 4.8.).

**Tablica 4.11.** Pomoćna tablica za vrednovanje koncepta pranja rublja B

Oznaka	Lanac fizikalnih efekata – vrednovanje prema kriteriju ekoeftektivnosti pretvorbi energije i signala	Dobrota (zbroj)
<i>L1</i>	$E_E \rightarrow E_{EM} = (-0,19); E_{EM} \rightarrow E_H = (-1,07); E_H \rightarrow E_{LH} = (-3,00).$	-4,26
<i>L2</i>	$E_E \rightarrow E_{EM} = (-0,19); E_{EM} \rightarrow E_{Me} = (-0,68); E_{Me} \rightarrow E_K = (0,28).$	-0,59
<i>L3</i>	$E_{HoO} \rightarrow E_A = (0,09); E_A \rightarrow E_{Ch} = (-0,87); E_{Ch} \rightarrow E_{LCh} = (-1,22).$	-2,00
<i>L4</i>	$E_E \rightarrow E_{EM} = (-0,19); E_{EM} \rightarrow E_{Me} = (-0,68); E_{Me} \rightarrow E_{WT} = (-0,18).$	-1,05
<i>L5</i>	$E_E \rightarrow E_{EM} = (-0,19); E_{EM} \rightarrow E_{Me} = (-0,68); E_{Me} \rightarrow E_K = (0,28).$	-0,59
<b>Ukupno:</b>	~12 transformacija < 0; ~3 transformacije > 0.	-8,49
Oznaka	Sekundarni efekti na okoliš – vrednovanje prema kriteriju ekološke prihvatljivosti sekundarnih efekata na okoliš	Dobrota
<i>S.Ef1</i> ( $E_H, E_{Ch}, E_K$ )	siva voda + nečistoće (toplinska, kemijska, kinetička) → odlaganje / ispuštanje otpada / emisija (znatan doprinos više kategorija utjecaja na okoliš) = (-8)	-8
<i>S.Ef2</i> ( $E_{LH}$ )	latentna toplinska energija → značajno malo otpada / emisija (mali utjecaji na okoliš) = (+9)	+9
<i>S.Ef3</i> ( $E_{Me}$ )	vibracije → značajno malo otpada / emisija (mali utjecaji na okoliš) = (+9)	+9
<i>S.Ef4</i> ( $E_{WT}$ )	buka → direktno odlaganje / ispuštanje inertnog otpada / emisija niske toksičnosti = (-3)	-3
<i>S.Ef5</i> ( $E_{LH}, E_{LCh}$ )	latentna toplinska, latentna kemijska energija (rublje) → indirektno odlaganje / ispuštanje inertnog otpada / emisija niske toksičnosti = (-2)	-2
<b>Ukupno:</b>	~5 sekundarnih efekata na okoliš (2 <i>S.Ef</i> > 0; 3 <i>S.Ef</i> < 0).	5

Oznake: *L1, L2, ... L5* – lanci fizikalnih efekata koncepta pranja rublja B (slika 4.9.), *S.Ef1, S.Ef2, ... S.Ef5* – sekundarni (latentni) efekti na okoliš (slika 4.7.), tablica 4.5.: oznake oblika energije i signala.

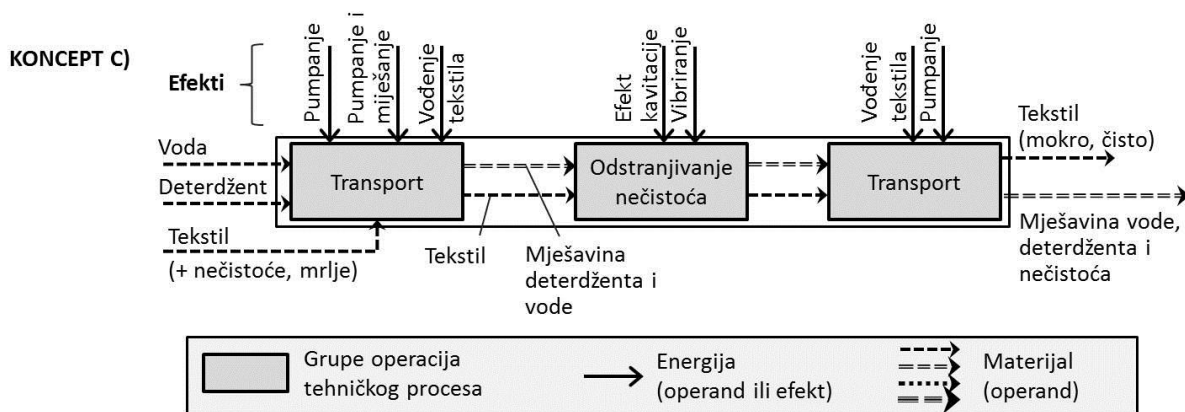
Ekološka prihvatljivost sekundarnih efekata na okoliš koji su toplinska energija ili latentna toplinska energija veća je u slučaju koncepta pranja rublja B nego u slučaju koncepta pranja rublja A stoga što je razlika temperature pranja i temperature okoliša (tj. topline koju tehnički sustav izmjenjuje s okolišem) manja kod koncepta B nego kod koncepta A. Zbog toga se sekundarnom efektu latentne toplinske energije na okoliš dodjeljuje viša ocjena ekološke prihvatljivosti kod koncepta B nego kod koncepta A (tablica 4.11.). Koncept pranja

rublja B ekološki je prihvatljiviji od koncepta pranja rublja A zbog bolje ekoeftektivnosti pretvorbi oblika energije i veće ukupne ekološke prihvatljivosti sekundarnih efekata na okoliš.

### 4.5.3. Koncept pranja rublja C

Za koncept pranja rublja C karakterističan je lanac pretvorbi energije kojim se realizira glavni fizikalni efekt – kavitacija. Procesi u kojima se pranje i čišćenje tekstila ostvaruju ultrazvučnim valovima i kavitacijom u tekućem mediju česti su u industriji proizvodnje i pripreme tekstila. Učinkovito otklanjanje nečistoća s rublja ultrazvukom ostvaruje se s pomoću vode i deterdženta, pred namakanjem rublja u kupki vode i deterdženta te ispiranjem tekstila u vodi nakon djelovanja kavitacijskog efekta.

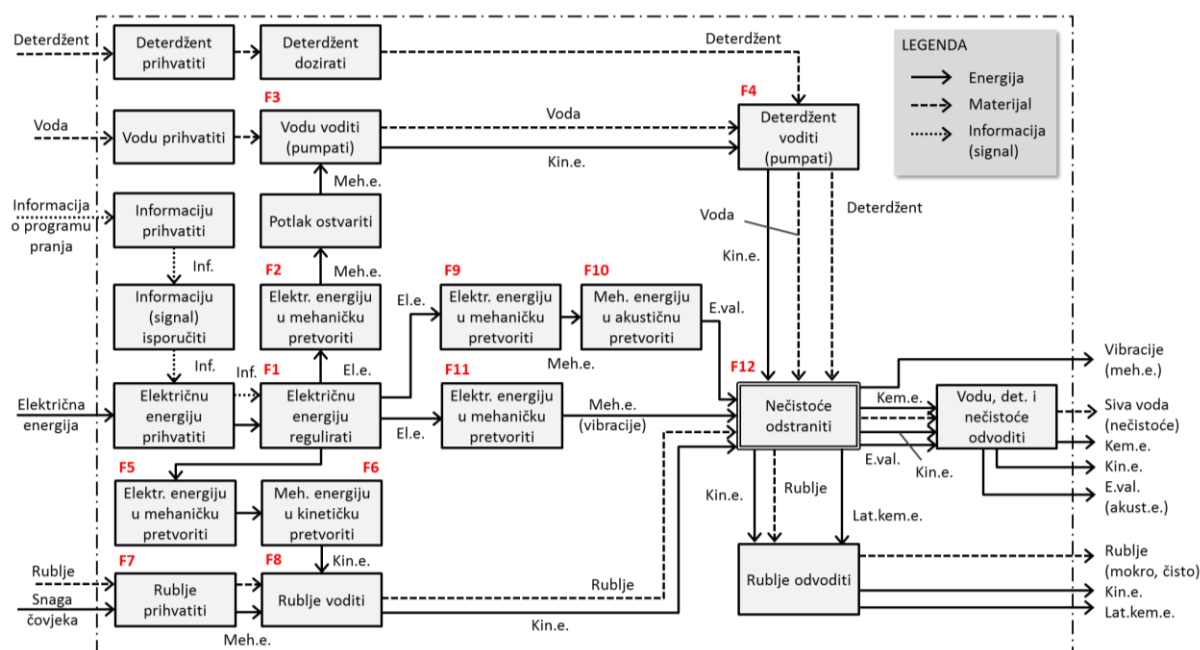
Efekt kavitacije postiže se prolaskom visokofrekventnih akustičnih valova kroz tekući medij, tj. vodu. Akustična energija potrebna za nastanak kavitacije ostvaruje se pretvorbom iz električne energije visoke frekvencije. Odstranjivanje nečistoća pospješuje se vibriranjem ploča na kojima se nalazi remenskim prijenosom vođeni tekstil, tj. rublje (slika 4.11.). Tekući deterdžent prodire među vlakna tekstila prolaskom kroz vodu i tekući deterdžent, a tekstil se pritom nalazi u području djelovanja kavitacije [321].



**Slika 4.11.** Tehnički proces i fizikalni efekti ultrazvučnog pranja rublja (koncept C)

Kavitacija uzrokuje ekstremne fizikalne i kemijske uvjete u inače hladnomu tekućem mediju. Akustična kavitacija efekt je koji nastaje zbog stvaranja, rasta i kolapsa mjehurića zraka uzrokovanih prolaskom zvučnog vala visoke intenzivnosti kroz tekućinu [322]. Kolaps mjehurića praćen je intenzivnim lokalnim zagrijavanjem i visokim tlakom koji su kratkog vijeka. Na području zahvaćenu kavitacijom temperature dosežu i do 5000 K, a tlak i do 100 MPa. Nakon pucanja mjehurića temperatura može strelovito padati, i više od  $10^{10}$  K u sekundi. Usprkos ekstremnim uvjetima u područjima zahvaćenima efektom kavitacije,

ultrazvučnim pranjem tekstila postižu se dobri rezultati odstranjivanja nečistoća sa površine tekstila, bez negativnih posljedica na tekstilnu tkaninu [323].



Slika 4.12. Funkcijska struktura koncepta pranja rublja C

Funkcijska struktura koncepta pranja rublja C (slika 4.12.) prikazuje 12 funkcija kod kojih postoje pretvorbe oblika energije i signala. Teorijske ekoeftivnosti pretvorbi iz ulaznog u izlazni oblik energije navedene su u pomoćnoj tablici za vrednovanje ekološke prihvatljivosti koncepta pranja rublja C (tablica 4.12.).

Zbroj teorijskih ekoeftivnosti pretvorbi energije i signala svojstvenih konceptu C veći je nego kod koncepta pranja rublja A i B. Glavni efekt kavitacije ostvaruje se lancem pretvorbi električne energije u mehaničku te mehaničke energije u akustičnu. Izostanak pretvorbi oblika energije koje bi uključivale generiranje toplinske energije utječe na iznos zbroja vrijednosti teorijskih ekoeftivnosti, pa time i na vrednovanje prema ovom kriteriju.

Koncept pranja rublja C osmišljen je prema prototipnom uređaju za ispitivanje učinkovitosti ultrazvučnoga pranja [285]. S obzirom da kod ovog prototipa nije osmišljeno principijelno rješenje automatskog prihvata rublja, za koncept C definirano je da bude poluautomatski uređaj kod kojega pozicioniranje i prihvata rublja obavlja čovjek, a ne tehnički sustav (slika 4.12.: funkcija F7).

**Tablica 4.12.** Pomoćna tablica za vrednovanje koncepta pranja rublja C

Oznaka	Lanac fizikalnih efekata – vrednovanje prema kriteriju ekoeftivnosti pretvorbi energije i signala	Dobrota (zbroj)
<i>L1</i>	$E_E \rightarrow E_{EM} = (-0,19); E_{EM} \rightarrow E_{Me} = (-0,68); E_{Me} \rightarrow E_K = (0,28).$	-0,59
<i>L2</i>	$E_{HoO} \rightarrow E_A = (0,09); E_A \rightarrow E_{Ch} = (-0,87); E_{Ch} \rightarrow E_{LCh} = (-1,22).$	-2,00
<i>L3</i>	$E_E \rightarrow E_{EM} = (-0,19); E_{EM} \rightarrow E_{WT} = (-0,87); E_{WT} \rightarrow E_{Me} = (0,18).$	-0,88
<i>L4</i>	$E_{Hu} \rightarrow E_{Me} = (-4,94).$	-4,94
<i>L5</i>	$E_E \rightarrow E_{EM} = (-0,19); E_{EM} \rightarrow E_{Me} = (-0,68); E_{Me} \rightarrow E_K = (0,28).$	-0,59
<b>Ukupno:</b>	~9 transformacija < 0; ~4 transformacije > 0.	-9,0
Oznaka	Sekundarni efekti na okoliš – vrednovanje prema kriteriju ekološke prihvatljivosti sekundarnih efekata na okoliš	Dobrota
<i>S.Ef1</i> ( $E_{Ch}, E_K, E_{WT}$ )	siva voda + nečistoće (kemijska, kinetička, akustična energija) → odlaganje / ispuštanje otpada / emisija (značajni doprinos više kategorija utjecaja na okoliš) = (-8)	-8
<i>S.Ef2</i> ( $E_{Me}$ )	vibracije → značajno malo otpada / emisija (mali utjecaji na okoliš) = (+9)	+9
<i>S.Ef3</i> ( $E_{LCh}, E_K$ )	latentna kemijska energija, kinetička energija (rublje) → indirektno odlaganje / ispuštanje inertnog otpada / emisija niske toksičnosti = (-2)	-2
<b>Ukupno:</b>	~3 sekundarnih efekata na okoliš (1 <i>S.Ef</i> > 0; 2 <i>S.Ef</i> < 0).	-1

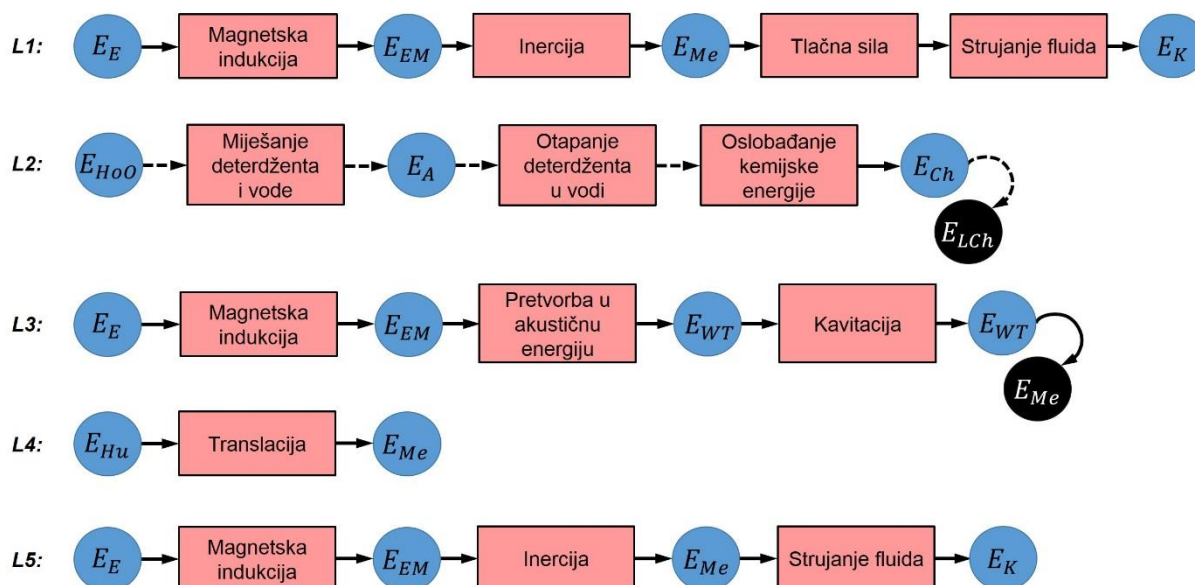
Oznake: *L1, L2, ... L5* – lanci fizikalnih efekata koncepta pranja rublja C (slika 4.13.), *S.Ef1, ..., S.Ef3* – sekundarni (latentni) efekti na okoliš (slika 4.12.), tablica 4.5.: oznake oblika energije i signala.

Teorijska ekoeftivnost pretvorbe čovjekove snage u mehaničku energiju negativnog je predznaka i iznosi -4,94 te se, prema tome, može zaključiti da je riječ o ekološki nepovoljnoj pretvorbi oblika energije. Ako koncept C ima automatski prihvrat rublja, pripadajući lanac fizikalnih efekata izgledao bi kao lanac *L5* (slika 4.13.). Tada bi ukupna teorijska ekoeftivnost lanca efekata kojim se ostvaruje prihvrat rublja (slika 4.12.: funkcije *F7, F8*) iznosila -4,65 (-9,0 umanjen za iznos lanca *L4*, slika 4.13., te uvećan za iznos lanca *L5*, slika 4.13.).

Sekundarni efekti koncepta pranja rublja C na okoliš prikazani su u pomoćnoj tablici vrednovanja koncepta C (tablica 4.12.). Prisutni su latentna kemijska energija, zaostale vibracije i kinetička energija.

Utjecaji na okoliš zbog sonifikacije sive vode koja se ispušta u odvod nakon završetka procesa pranja rublja nisu dovoljno istraženi u literaturi. Za ovaj sekundarni efekt na okoliš pretpostavljena je jednaka ekološka prihvatljivost kao za sivu vodu kod koncepta pranja rublja A i B. Broj je sekundarnih efekata na okoliš 3, što je manje od broja sekundarnih efekata na okoliš kod koncepta pranja rublja A i B.





Slika 4.13. Lanci fizikalnih efekata koncepta pranja rublja C (legenda: slika 4.8.)

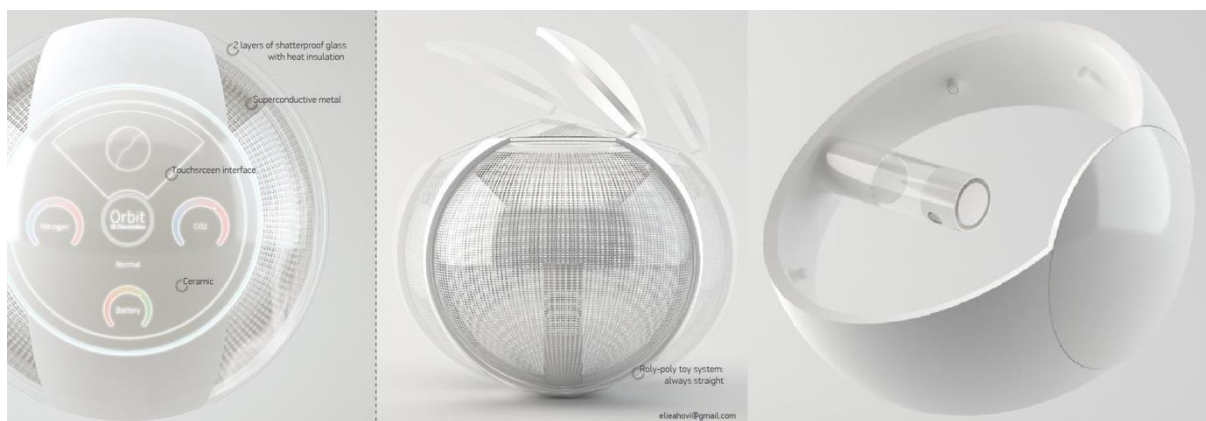
Na osnovi manjega broja sekundarnih efekata na okoliš i manjega broja transformacija energije i signala, koncept pranja rublja C ekološki je prihvatljiviji od koncepta pranja rublja A i B. Ekoefektivnost pretvorbi energije i signala koncepta C s poluautomatskim prihvatom rublja manja je od ekoefektivnosti pretvorbi energije i signala koncepta pranja rublja A i B.

#### 4.5.4. Koncept pranja rublja D<sup>a</sup>

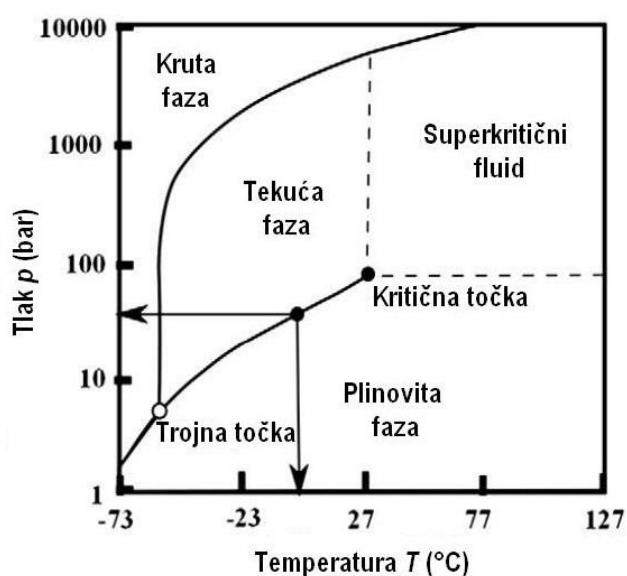
Kod koncepta pranja rublja D<sup>a</sup> otklanjanje nečistoća s rublja ostvaruje se kriogeničkim hlađenjem ugljikovim dioksidom. Idejno rješenje procesa čišćenja rublja suhim ledom opisano je konceptom 'Orbit' [289]. U opisu tog koncepta nisu dostupni parametri procesa čišćenja rublja, a o komponentama je moguće zaključivati samo na temelju ilustracija i skica perilice 'Orbit' (slika 4.14.). Pretragom патената osmišljeno je konceptijsko rješenje D<sup>a</sup> kojim se čišćenje tekstila ostvaruje strujanjem zraka i ugljikova dioksida iz peleta suhog leda.

Čišćenje suhim ledom provodi se tako da se postiže ekspanzija ugljikova dioksida koji prelazi u plinovito stanje. Odstranjivanje nečistoća s površina ostvaruje se usmjerenom strujom zraka i ugljikova dioksida, pri čemu je za efektivnost čišćenja potrebno ostvariti velike brzine izlazne struje. Zrak iz plinovite smjese pritom se dobavlja iz okoliša.

Suhi je led naziv za ugljikov dioksid u krutom stanju na temperaturi  $-78,5\text{ }^{\circ}\text{C}$  ili nižoj, pri normalnome tlaku. Ugljikov dioksid sublimira izravno iz krute tvari u plin na temperaturama većima od  $-78,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ , pri normalnome tlaku (slika 4.15.).



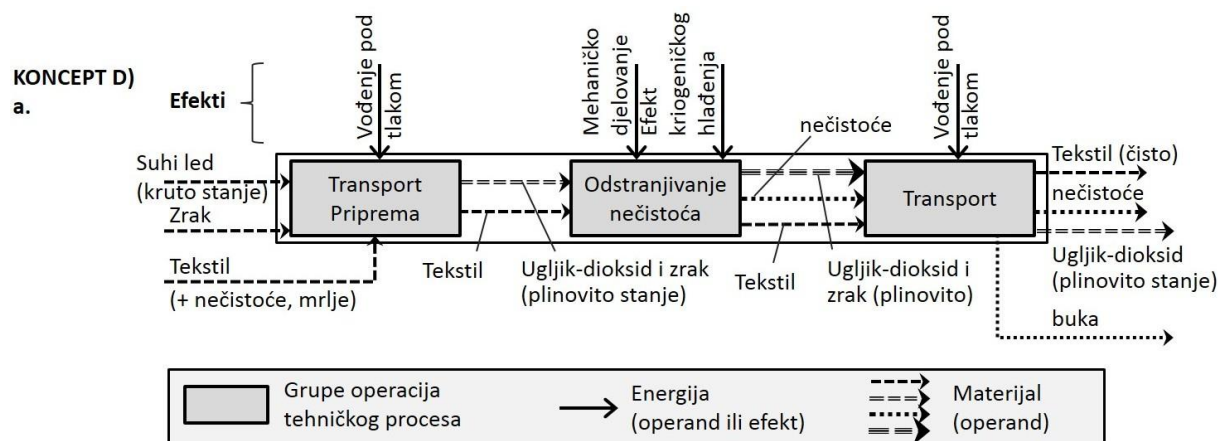
**Slika 4.14.** Principijelna rješenja i glavne komponente 'Orbit' koncepta [289]



**Slika 4.15.** Fazni dijagram ugljikova dioksida (tlak – temperatura) [324]

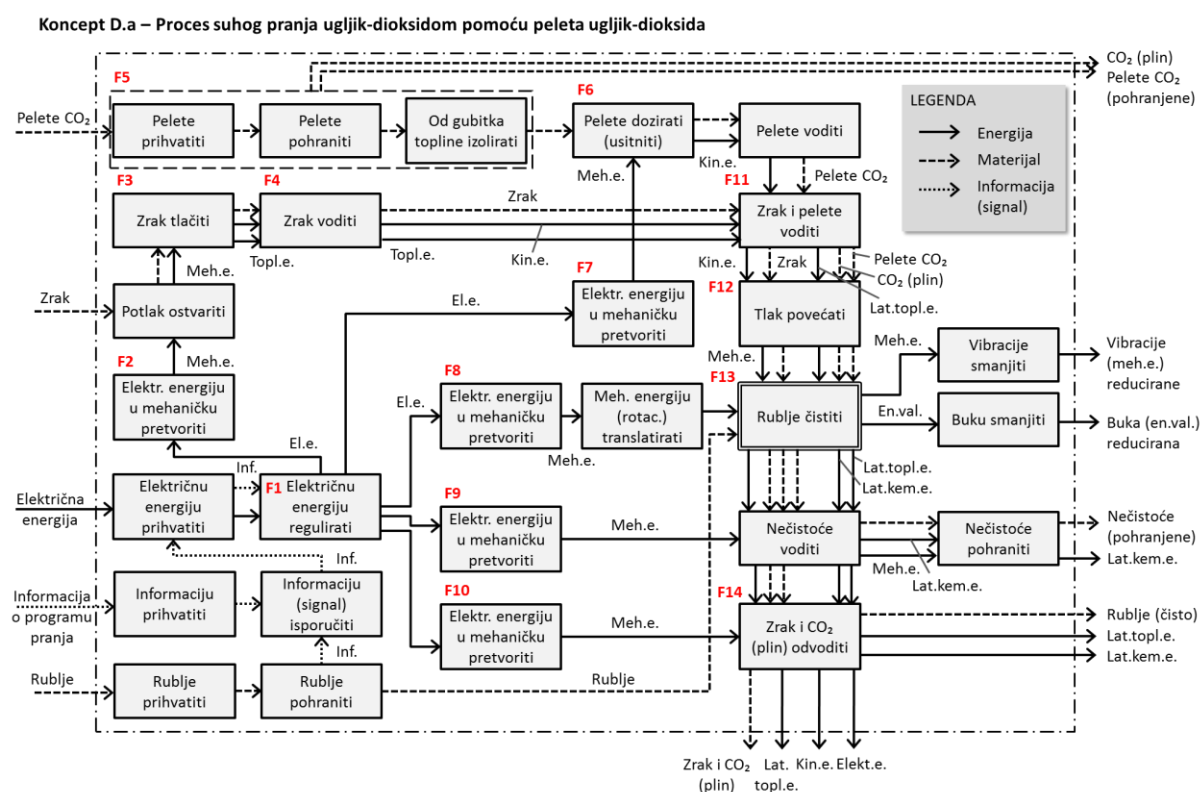
Zahvaljujući svojstvu da izravno sublimira iz krutoga stanja u plinovito njegovim topljenjem nema nusprodukata u obliku tekućine. Suhi led se upotrebljuje u procesima u kojima je potreban plin pod tlakom, a nije skup ni zapaljiv. Suhi led u obliku peleta proizvodi se pothlađivanjem ugrijanoga ugljikova dioksida pri visokom tlaku (40 – 48 GPa), zbog čega se on skrutne i poprima oblik snijega. Da bi se dobio pod tlakom, plin se tlači na oko 6 MPa te se na ovaj način velika količina plina može pohraniti u spremnicima. Peleti suhog leda promjera 0,5 – 3 mm dobivaju se protiskivanjem kroz rešetkastu matricu.

Koncepcijska varijanta pranja rublja D<sup>a</sup> osmišljena je po uzoru na uređaj za čišćenje površina suhim ledom [324], [325]. Peleti suhog leda uobičajeno su na temperaturi od 80 °C te se s pomoću mlaznog uređaja ubrzavaju do brzine od 150 do 300 m/s [326].



*Slika 4.16. Tehnički proces i efekti procesa pranja rublja suhim ledom (a-varijanta koncepta pranja rublja D)*

Slika 4.16. prikazuje tehnički proces pranja rublja suhim ledom. Funkcijska struktura koncepta D<sup>a</sup> prikazuje ukupno 14 funkcija kod kojih postoje pretvorbe energije ili signala iz jednog oblika u drugi (slika 4.17.). Čak 12 od ukupno 16 pretvorbi oblika energije ili signala čine pretvorbe negativnoga predznaka te su time ekološki neprihvatljive pretvorbe (tablica 4.13.).



*Slika 4.17. Funkcijska struktura koncepta pranja rublja D<sup>a</sup>*

Sekundarni efekti na okoliš i njihovo vrednovanje prikazani su u pomoćnoj tablici za vrednovanje koncepta pranja rublja D<sup>a</sup> (tablica 4.13.). Vrednovanje ekološke prihvatljivosti sekundarnih efekata na okoliš provedeno je prema vrijednosnoj ljestvici (tablica 4.8.). Slika 4.18. prikazuje četiri lanca fizikalnih efekata koncepta pranja rublja D<sup>a</sup>.

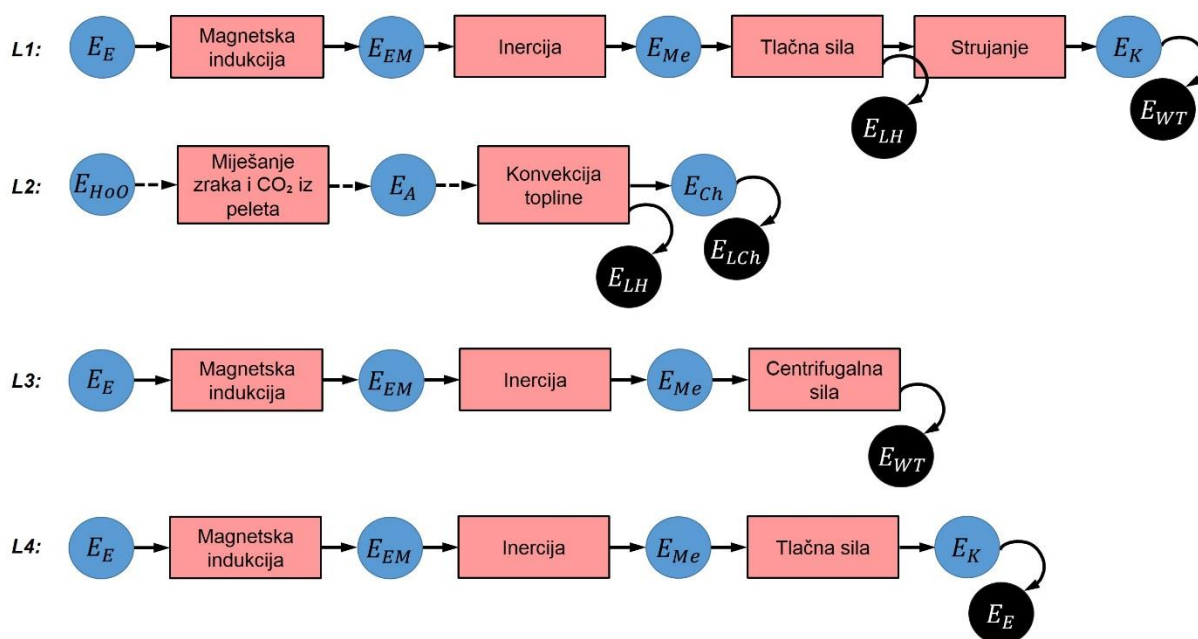
**Tablica 4.13.** Pomoćna tablica za vrednovanje koncepta pranja rublja D<sup>a</sup>

Oznaka	Lanac fizikalnih efekata – vrednovanje prema kriteriju koefektivnosti pretvorbi energije i signala	Dobrota (zbroj)
<b>L1</b>	$E_E \rightarrow E_{EM} = (-0,19)$ ; $E_{EM} \rightarrow E_{Me} = (-0,68)$ ; $E_{Me} \rightarrow E_K = (0,28)$ ; $E_K \rightarrow E_{WT} = (-0,46)$ . $E_{Me} \rightarrow E_{LH} = (-3,38)$ .	-4,43
<b>L2</b>	$E_{HOO} \rightarrow E_A = (0,09)$ ; $E_A \rightarrow E_{Ch} = (-0,87)$ ; $E_{Ch} \rightarrow E_{LCh} = (-1,22)$ . $E_A \rightarrow E_{LH} = (-3,96)$ .	-5,96
<b>L3</b>	$E_E \rightarrow E_{EM} = (-0,19)$ ; $E_{EM} \rightarrow E_{Me} = (-0,68)$ ; $E_{Me} \rightarrow E_{WT} = (-0,18)$ .	-1,05
<b>L4</b>	$E_E \rightarrow E_{EM} = (-0,19)$ ; $E_{EM} \rightarrow E_{Me} = (-0,68)$ ; $E_{Me} \rightarrow E_K = (0,28)$ ; $E_K \rightarrow E_E = (0,49)$ .	-0,10
<b>Ukupno:</b>	~12 transformacija < 0; ~4 transformacije > 0.	-11,54
Oznaka	Sekundarni efekti na okoliš – vrednovanje prema kriteriju ekološke prihvatljivosti sekundarnih efekata na okoliš	Dobrota
<b>S.Ef1 (E<sub>A</sub>)</b>	CO <sub>2</sub> (plin) → odlaganje / ispuštanje otpada / emisija (znatan doprinos više kategorija utjecaja na okoliš) = (-8)	-8
<b>S.Ef2 (E<sub>A</sub>)</b>	peleti suhog leda (pohranjeni) → indirektno odlaganje / ispuštanje otpada / emisija srednje toksičnosti = (-6)	-6
<b>S.Ef3 (E<sub>Me</sub>)</b>	vibracije → značajno malo otpada / emisija (mali utjecaji na okoliš) = (+9)	+9
<b>S.Ef4 (E<sub>WT</sub>)</b>	buka → direktno odlaganje / ispuštanje inertnog otpada / emisija srednje toksičnosti = (-7)	-7
<b>S.Ef5 (E<sub>LCh</sub>)</b>	nečistoće → direktno odlaganje / ispuštanje inertnog otpada / emisija niske toksičnosti = (-3)	-3
<b>S.Ef6 (E<sub>LH</sub>, E<sub>LCh</sub>)</b>	latentna toplinska, latentna kemijska energija (rublje) → indirektno odlaganje / ispuštanje inertnog otpada / emisija niske toksičnosti = (-2)	-2
<b>S.Ef7 (E<sub>A</sub>, E<sub>LCh</sub>, E<sub>K</sub>)</b>	zrak i CO <sub>2</sub> (plin) → odlaganje / ispuštanje otpada / emisija visoke toksičnosti = (-9)	-9
<b>S.Ef8 (E<sub>E</sub>)</b>	statički elektricitet → odlaganje / ispuštanje otpada / emisija (znatan doprinos jednoj kategoriji utjecaja na okoliš) = (-4)	-4
<b>Ukupno:</b>	8 sekundarnih efekata na okoliš (1 S.Ef > 0; 7 S.Ef < 0).	-30

Oznake: L1, L2, ... L4 – lanci fizikalnih efekata koncepta pranja rublja D<sup>a</sup> (slika 4.18.), S.Ef1, S.Ef2, ..., S.Ef8 – sekundarni (latentni) efekti na okoliš (slika 4.17.), tablica 4.5.: oznake oblika energije i signala.

Ekološka prihvatljivost u spremniku pohranjenih peleta ugljikova dioksida ocjenjena je ocjenom -6 jer je riječ o posrednim, za okoliš nepovoljnim posljedicama (tablica 4.13.). Ispuštanje ugljikova dioksida u okoliš vrednovano je ocjenom -8 zbog znatnog doprinosa više kategorija utjecaja na okoliš (utjecaj na zdravlje ljudi i problemi za okoliš uzrokovani

povećanjem udjela ugljikova dioksida u atmosferi). Buka koja nastaje zbog strujanja zraka i ugljikova dioksida znatna je i veća nego u slučaju ostalih koncepata pranja rublja pa je stoga buka kao sekundarni efekt na okoliš vrednovana ocjenom -7. Zbog velikih brzina strujanja zraka i ugljikova dioksida dolazi do statičkog elektriciteta te je ovaj sekundarni efekt na okoliš vrednovan ocjenom dobrote -4 zbog znatnog doprinosa jednoj kategoriji utjecaja na okoliš (u ovom slučaju utjecaju na zdravlje ljudi). Slika 4.18. prikazuje lanac fizikalnih efekata koncepta pranja rublja suhim ledom.

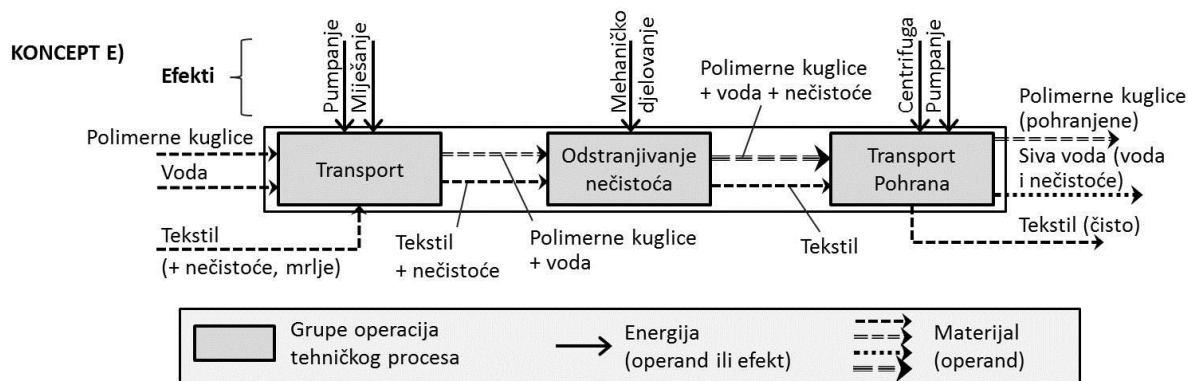


**Slika 4.18.** Lanci fizikalnih efekata koncepta pranja rublja  $D^a$  (legenda: slika 4.8.)

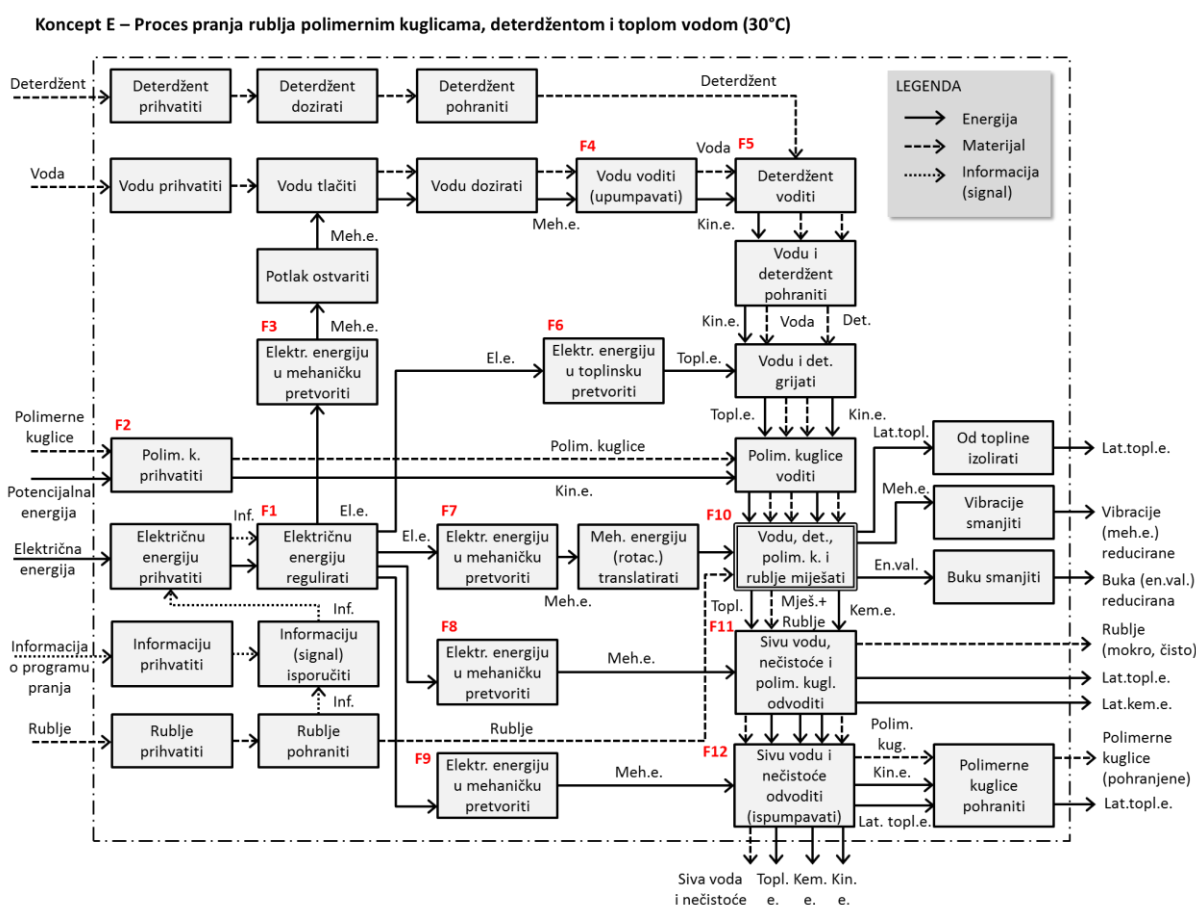
#### 4.5.5. Koncept pranja rublja E

Koncept E jest koncept pranja rublja polimernim kuglicama, toplom vodom i praškastim deterdžentom za strojno pranje rublja. Slika 4.19. prikazuje tehnički proces i fizikalne efekte procesa pranja rublja koncepta E.

Funkcijska struktura koncepta pranja rublja E (slika 4.20.) razlikuje se od funkcijske strukture koncepta pranja rublja A (slika 4.7.) po tome što je mehaničko djelovanje na rublje potpomognuto polimernim kuglicama, a kemijsko djelovanje praška za pranje na rublje ostvaruje se na temperaturama od oko 30 °C.



Slika 4.19. Tehnički proces i efekti procesa pranja rublja (koncept E)



Slika 4.20. Funkcijska struktura koncepta E

Prihvat polimernih kuglica (slika 4.20.: funkcija F2) ostvaruje se pretvorbom potencijalne energije polimernih kuglica u kinetičku energiju. U pomoćnoj tablici (tablica 4.14.) prikazan je veći broj ekološki negativnih pretvorbi energija i veći broj sekundarnih efekata na okoliš nego kod konceptata pranja rublja A i B, i to zbog polimernih kuglica koje čine jedan tijek materijala više nego u funkcijskim strukturama tih konceptata pranja rublja A i B.



**Tablica 4.14.** Pomoćna tablica za vrednovanje koncepta pranja rublja E

Oznaka	Lanac fizikalnih efekata – vrednovanje prema kriteriju ekoeftivnosti pretvorbi energije i signala	Dobrota (zbroj)
<b>L1</b>	$E_E \rightarrow E_{EM} = (-0,19); E_{EM} \rightarrow E_H = (-1,07); E_H \rightarrow E_{LH} = (-3,00).$	-4,26
<b>L2</b>	$E_E \rightarrow E_{EM} = (-0,19); E_{EM} \rightarrow E_{Me} = (-0,68); E_{Me} \rightarrow E_K = (0,28).$	-0,59
<b>L3</b>	$E_{HOO} \rightarrow E_A = (0,09); E_A \rightarrow E_{Ch} = (-0,87); E_{Ch} \rightarrow E_{LCh} = (-1,22).$	-2,00
<b>L4</b>	$E_E \rightarrow E_{EM} = (-0,19); E_{EM} \rightarrow E_{Me} = (-0,68); E_{Me} \rightarrow E_{WT} = (-0,18).$	-1,05
<b>L5</b>	$E_E \rightarrow E_{EM} = (-0,19); E_{EM} \rightarrow E_{Me} = (-0,68); E_{Me} \rightarrow E_K = (0,28).$	-0,59
<b>L6</b>	$E_P \rightarrow E_K = (0,07); E_K \rightarrow E_{Me} = (-0,28); E_{Me} \rightarrow E_{WT} = (-0,18).$	-0,39
<b>Ukupno:</b>	~15 transformacija < 0; ~4 transformacije > 0.	-8,88
Oznaka	Sekundarni efekti na okoliš – vrednovanje prema kriteriju ekološke prihvatljivosti sekundarnih efekata na okoliš	Dobrota
<b>S.Ef1 (<math>E_H, E_{Ch}, E_K</math>)</b>	siva voda + nečistoće (toplinska, kemijska, kinetička) → odlaganje / ispuštanje otpada / emisija (znatni doprinos više kategorija utjecaja na okoliš) = (-8)	-8
<b>S.Ef2 (<math>E_{LH}</math>)</b>	latentna toplinska energija → značajno malo otpada / emisija (mali utjecaji na okoliš) = (+9)	+9
<b>S.Ef3 (<math>E_{Me}</math>)</b>	vibracije → značajno malo otpada / emisija (mali utjecaji na okoliš) = (+9)	+9
<b>S.Ef4 (<math>E_{WT}</math>)</b>	buka → direktno odlaganje / ispuštanje inertnog otpada / emisija niske toksičnosti = (-3)	-3
<b>S.Ef5 (<math>E_{LH}, E_{LCh}</math>)</b>	latentna toplinska, latentna kemijska energija (rublje) → indirektno odlaganje / ispuštanje inertnog otpada / emisija niske toksičnosti = (-2)	-2
<b>S.Ef6 (<math>E_A</math>)</b>	polimerne kuglice (pohranjene) → ponovna uporaba otpada / emisija (ili ostvarivo uz manje izmjene) = (+7)	+7
<b>S.Ef7 (<math>E_{LH}, E_{LCh}</math>)</b>	latentna toplinska, latentna kemijska energija (polimerne kuglice) → indirektno odlaganje / ispuštanje inertnog otpada / emisija niske toksičnosti = (-2)	-2
<b>Ukupno:</b>	~7 sekundarnih efekata na okoliš (3 S.Ef > 0; 4 S.Ef < 0).	-2

Oznake: L1, L2, ... L6 – lanci fizikalnih efekata koncepta E, S.Ef1, S.Ef2, ... S.Ef7 – sekundarni (latentni) efekti na okoliš (slika 4.20.), tablica 4.5.: oznake oblika energije i signala.

#### 4.5.6. Vrednovanje predloženom metodom (koncepti A, B, C, D<sup>a</sup> i E)

Rezultati vrednovanja koncepata pranja rublja A, B, C, D<sup>a</sup> i E sažeti su u matrici odlučivanja (tablica 4.15.). Podatci o vrednovanju prema svakom kriteriju ekološke prihvatljivosti upisuju se u matricu odlučivanja. Spomenuti podatci o vrednovanju prema svakom kriteriju nalaze se u pomoćnim tablicama za vrednovanje ekološke prihvatljivosti koncepata (tablica 4.10., tablica 4.11., tablica 4.12., tablica 4.13. i tablica 4.14.). Uporaba pomoćnih tablica omogućuje konstruktorima zapisivanje parcijalnih teorijskih ekoeftivnosti pretvorbi energija i signala i parcijalnih ekoloških prihvatljivosti sekundarnih efekata na

okoliš što pojednostavnjuje postupak upisivanja podataka o konceptima u matricu odlučivanja.

U matrici odlučivanja dodjeljuje se rang konceptima; prvo za svaki kriterij ekološke prihvatljivosti, a potom se primjenjuje tehnika sume rangova kako bi vrednovanje rezultiralo rangiranjem koncepata prema ekološkoj prihvatljivosti. Rezultat vrednovanja ekološke prihvatljivosti predloženom metodom jest rangiranje vrednovanih koncepata, od ekološki prihvatljivih do ekološki manje prihvatljivih koncepata iz skupa.

**Tablica 4.15.** Matrica odlučivanja (koncepti pranja rublja A, B, C, D<sup>a</sup> i E)

Koncepti	Kriteriji ekološke prihvatljivosti $C_j$ , rang $e_{ij}$										
	$S_{\epsilon_{TR}}$ (maks.)	$e_{i1}$	$N_{\epsilon_{TR}}$ (min.)	$e_{i2}$	$S_{\epsilon_{EF}}$ (maks.)	$e_{i3}$	$N_{\epsilon_{EF}}$ (min.)	$e_{i4}$	$N_{Agr}$ (min.)	$e_{i5}$	$V_{eij}$
$\alpha$	-8,49	1	15	2	-7	4	5	2	1	2	11
$\beta$	-8,49	1	15	2	5	1	5	2	1	2	8
$\gamma$	-9,0	2	13	1	-1	2	3	1	0	1	7
$\delta^a$	-11,54	4	16	3	-30	5	8	4	2	3	19
$\epsilon$	-8,88	3	19	4	-2	3	7	3	1	2	15

Oznake:  $\alpha$  – koncept A,  $\beta$  – koncept B,  $\gamma$  – koncept C,  $\delta^a$  – koncept D<sup>a</sup>,  $\epsilon$  – koncept E,  $S_{\epsilon_{TR}}$  – ekoeftektivnost pretvorbi energije i signala (tablica 4.6.),  $N_{\epsilon_{TR}}$  – broj pretvorbi energije i signala,  $S_{\epsilon_{EF}}$  – zbroj ekološke prihvatljivosti sekundarnih efekata na okoliš (tablica 4.8.),  $N_{\epsilon_{EF}}$  – broj sekundarnih efekata na okoliš,  $N_{Agr}$  – broj promjena agregatnoga stanja materijala,  $V_{eij}$  – suma rangova  $e_{ij}$ , (maks.)/(min.) – maksimirajući ili minimizirajući kriterij ekološke prihvatljivosti.

Rangiranje koncepata pranja rublja predloženom metodom upućuje na to da je koncept ultrazvučnoga pranja rublja (koncept C) ekološki najprihvatljiviji koncept u skupu vrednovanih koncepata. Koncept pranja rublja pjenom deterdženta i toplom vodom na temperaturi od 30 °C (koncept B) sljedeći je prema ekološkoj prihvatljivosti. Koncept pranja rublja praškastim deterdžentom i toplom vodom na temperaturama od 60 i 90 °C (koncept A) srednji je koncept po ekološkoj prihvatljivosti. Na začelju rangiranja, kao ekološki najmanje prihvatljivi koncepti našli su se koncepti pranja rublja E i D<sup>a</sup>.

Iz funkcijske strukture koncepta pranja polimernim kuglicama (koncept E) vidljivo je da ovaj koncept ima veći broj pretvorbi energije, materijala i signala (i, u skladu s tim, lanaca fizikalnih efekata) od stalih koncepata u skupu. Iako je koncept pranja rublja E prema kriteriju teorijske ekoeftektivnosti pretvorbi energije i signala vrednovan kao ekološki najmanje prihvatljiv koncept u skupu, rezultati vrednovanja pokazuju da je koncept pranja rublja D<sup>a</sup> manje ekološki prihvatljiv prema više kriterija ekološke prihvatljivosti. Sukladno tomu,



koncept suhoga pranja peletima ugljikova dioksida (koncept D<sup>a</sup>) najmanje je ekološki prihvatljiv koncept u skupu vrednovanih koncepata pranja rublja.

Dodjeljivanje vrijednosti kojima se opisuje ekološka prihvatljivost sekundarnih efekata na okoliš može se smatrati kvalitativnim, odnosno subjektivnim načinom vrednovanja. Objektivno vrednovanje predloženom metodom moguće je postići imajući na umu svrhu vrednovanja te nastojeći postići što veću usporedivost modela funkcija pojedinih koncepata. Dodjeljivanje vrijednosti solarnih faktora transformabilnosti mora biti jednoznačno za sve pretvorbe iste vrste, a sekundarne efekte na okoliš iste vrste potrebno vrednovati jednako ako se pojavljuju u više od jednog koncepta. Ako je fizikalni efekt ili sekundarni efekt na okoliš zanemaren kod jednog koncepta, mora biti zanemaren i kod ostalih koncepata koji se vrednuju.

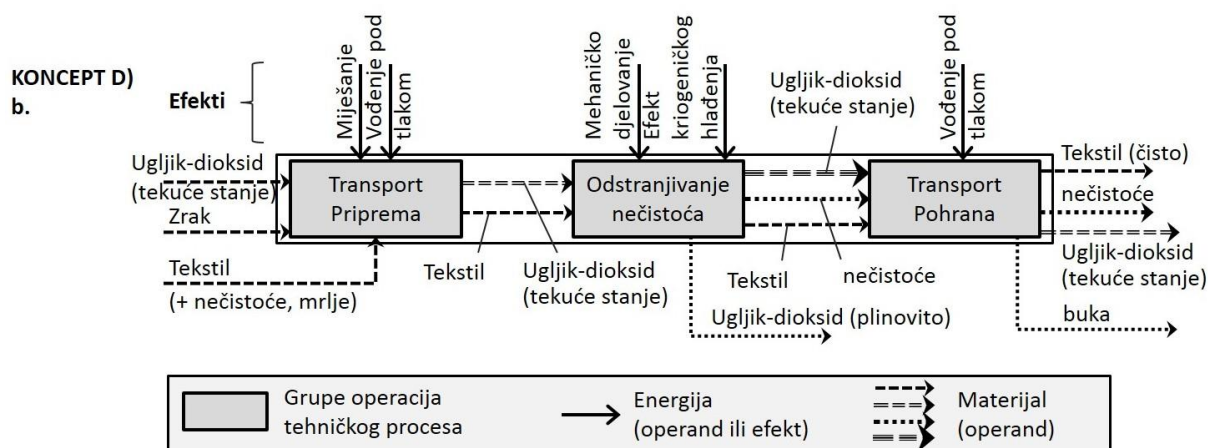
### **4.6. Ispitivanje konzistentnosti predložene metode zamjenom jednog koncepta iz skupa**

Validacija elementa predložene metode koji se odnosi na konzistentnost rangiranja temelji se na provjeri da li zamjena jednog koncepta drugim koji je ekološki manje prihvatljiv uzrokuje promjenu rangiranja ostalih ekološki prihvatljivijih koncepata [327]. Koncept pranja rublja D<sup>a</sup> zamijenjen je konceptom pranja rublja D<sup>b</sup> u skupu koncepata pranja rublja.

#### **4.6.1. Koncept pranja rublja D<sup>b</sup>**

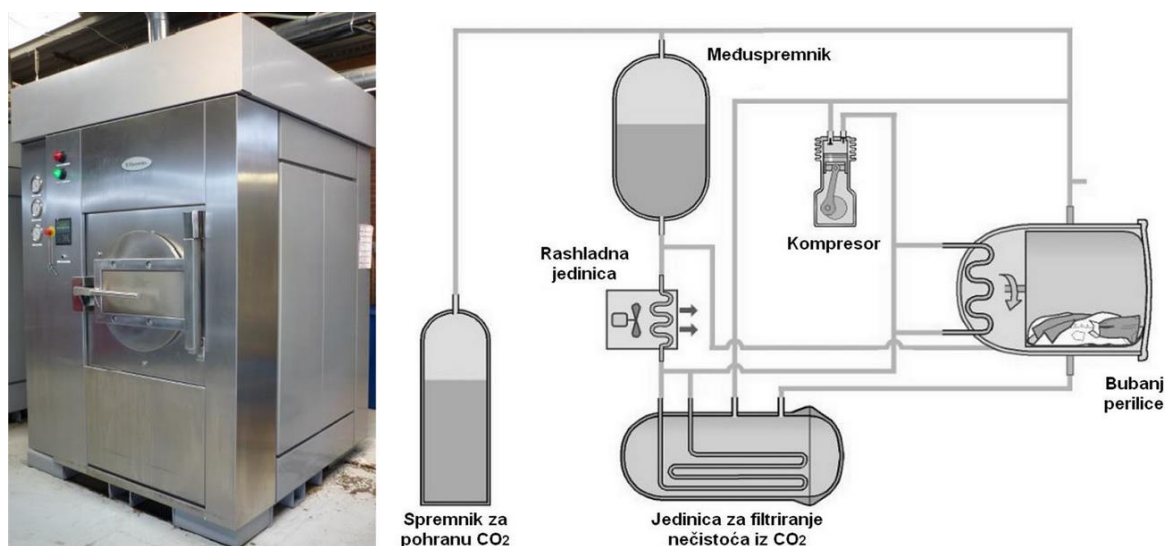
Koncepcijska varijanta D<sup>b</sup> osmišljena je po uzoru na uređaj za suho pranje rublja ukapljenim ugljikovim dioksidom [324]. Primjer implementacije koncepta jest *Electrolux Wascator S-35* [324] kojim se pranje rublja izvodi u komori za čišćenje rublja. Uređaj se koristi ukapljenim ugljikovim dioksidom, a odstranjivanje nečistoća i mrlja ostvaruje se i mehaničkim odstranjivanjem zbog rotacije komore, odnosno bubnja perilice.

*Electrolux Wascator S-35* [324] primjer je ekološki prihvatljivije alternative procesu kemijskoga pranja rublja, ali je efektivnost pranja rublja ukapljenim ugljikovim dioksidom manja od efektivnosti procesa kemijskoga pranja rublja. Slika 4.21. prikazuje tehnički proces pranja rublja tekućim ugljikovim dioksidom. Proces započinje stvaranjem vakuuma u bubnju perilice i otpuštanjem ugljikova dioksida, prvo u plinovitom, a onda u tekućem stanju iz prostora spremnika ukapljenoga ugljikova dioksida. Mlaznicama se postiže usmjerena struja i raspršivanje ukapljenoga ugljikova dioksida po rublju u bubnju perilice.



**Slika 4.21.** Tehnički proces i efekti procesa pranja rublja/tekstila suhim ledom (b-varijanta koncepta D)

Slika 4.22. prikazuje komercijalni proizvod *Electrolux Wascator S-35* [324] i skicu procesa čišćenja ugljikovim dioksidom koncepta D<sup>b</sup>. Proces počinje s ukapljenim ugljikovim dioksidom pohranjenim pod tlakom ~6 MPa. Ukapljeni ugljikov dioksid hrani „peletizer“ koji ga pretvara u kruti ugljikov dioksid (pahuljice suhoga leda), a dodatnom kompresijom nastaju kuglice suhoga leda (peleti) temperature oko ~80 °C. Kuglice suhog leda ubacuju se u tijek komprimiranoga zraka i velikom brzinom (150 – 300 m/s) mlaznicama projiciraju na ciljenu površinu.

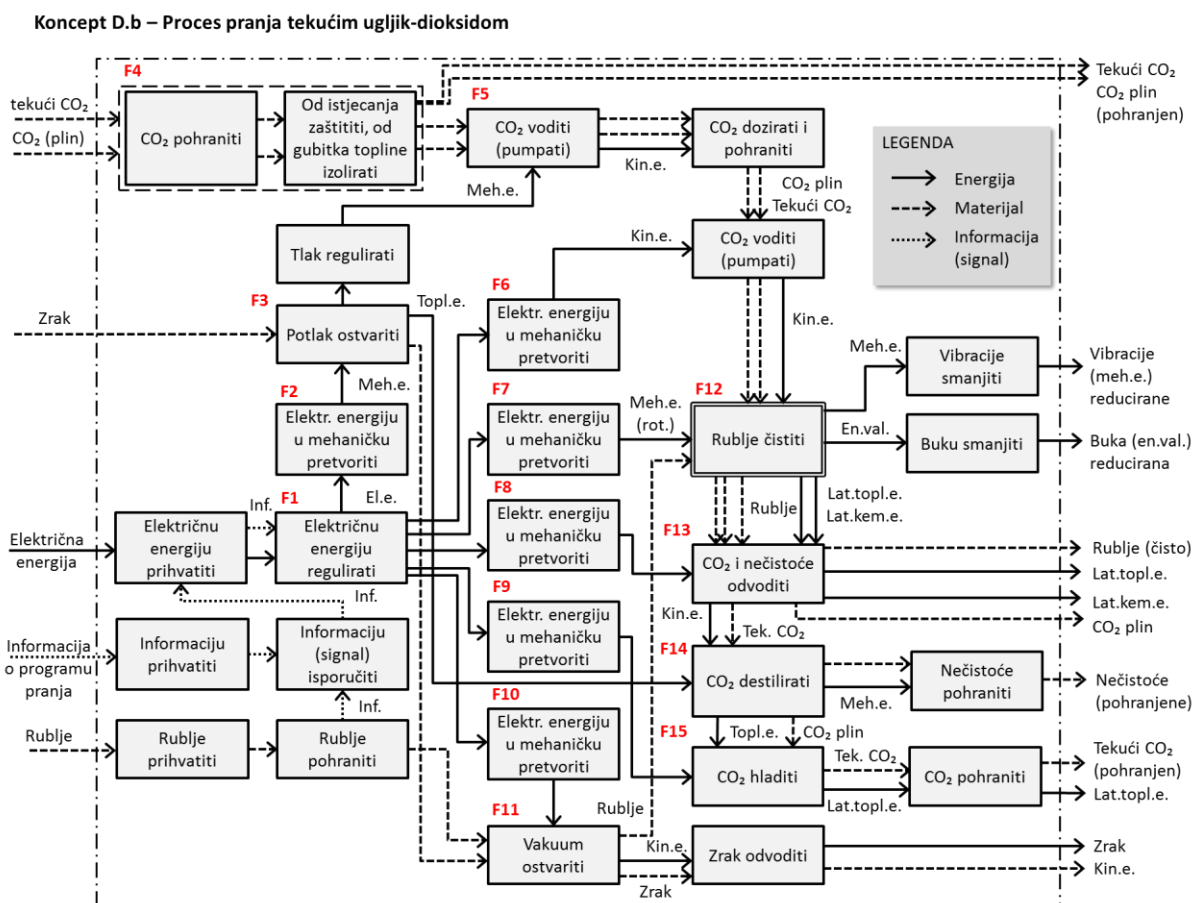


**Slika 4.22.** Uređaj *Electrolux Wascator S-35* (lijevo) i prikaz radnog principa (desno) [324]

Nakon što udare o površinu, nastaje ekstremna razlika u temperaturi (toplinski udar) između nečistoća i temeljne podloge, što uzrokuje slabljenje kemijskih i fizičkih veza između površine materijala i podloge. Odmah nakon udara kuglice leda počinju sublimirati i strujati

velikom brzinom uz površinu na koju su usmjerene. Velike brzine usmjerene struje ugljikova dioksida uzrokuju i ekstremne razlike u gustoći između plinovitih i krutih faza. Zbog kontakta suhog leda i površine koja se čisti, sloj nečistoće i tretirano područje naglo se ohlade. Nečistoće se odvajaju sa površina zbog krutosti nečistoća i zbog napuklina na površini nečistoća te s pomoću komprimiranog zraka. Ta kinetička energija odvajanja nečistoće, a rezultat je čista površina. Suhi led isparuje i nečistoće ostaju na dnu bubnja.

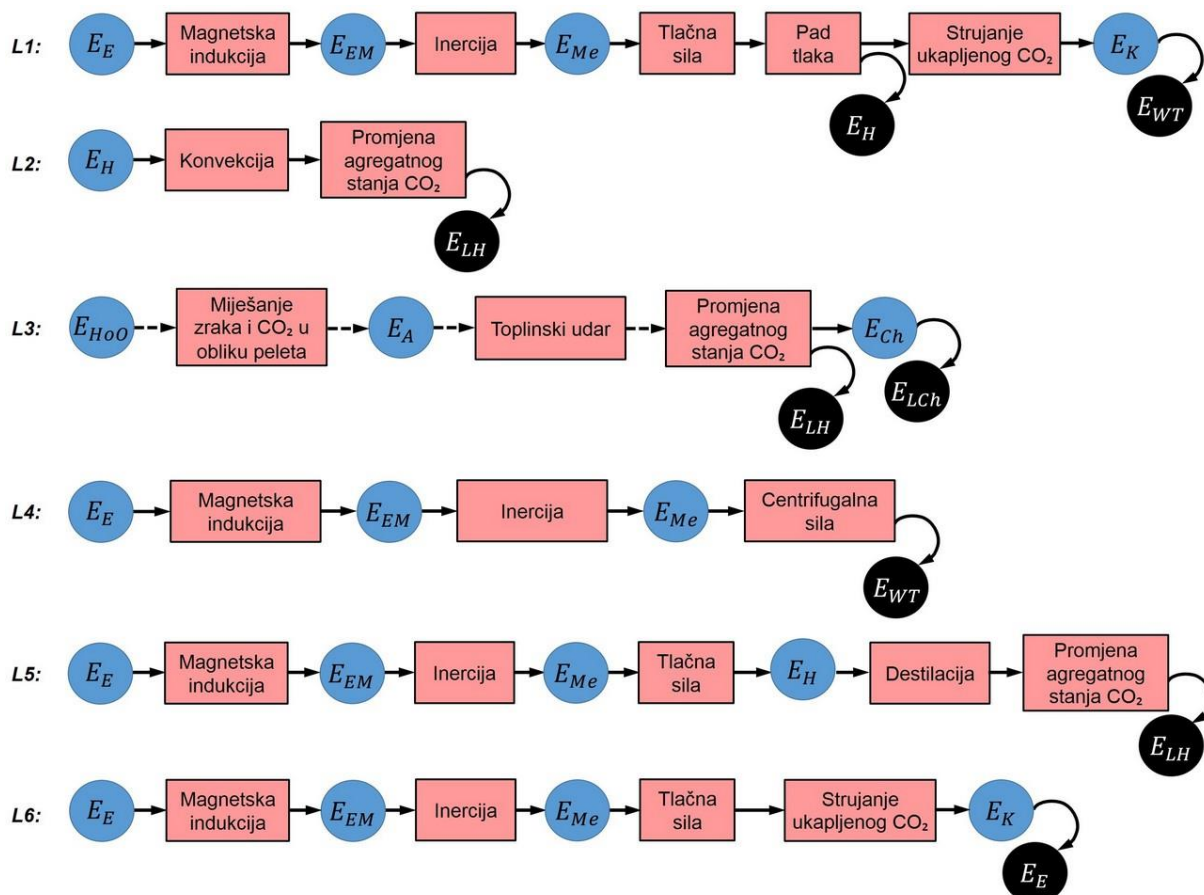
Nakon završetka procesa ovoga 'suhog' pranja dio se ugljikova dioksida otpušta u okoliš u obliku plina (tablica 4.16.: *S.Ef5*), a preostali dio ugljikova dioksida u tekućem stanju vakuumskom se pumpom odvodi do destilacijske jedinice. Destilacijom, odnosno zagrijavanjem ugljikova dioksida postiže se njegova pretvorba u plinoviti oblik, a potom se pothlađivanjem ponovno pohranjuje u tekućem obliku za sljedeći ciklus pranja.



**Slika 4.23.** Funkcijska struktura koncepta pranja rublja  $D^b$

Nakon završetka procesa pranja tekućim ugljikovim dioksidom nečistoće odstranjene s rublja pohranjuju se u posebnome spremniku. Nečistoće koje su bile u kontaktu s ugljikovim dioksidom klasificiraju se kao kemijski otpad, te zahtijevaju specijalno odlaganje.

Ukapljeni ugljikov dioksid upotrebljava se kao rashladno sredstvo i sredstvo za gašenje požara. Kontakt s tekućim ili krutim ugljikovim dioksidom može uzrokovati ozeblina ili hladne opekline. Kako je ugljikov dioksid teži od zraka, može se akumulirati u uleknućima i sličnim prostorima uz tlo. Plin je zabranjeno ispuštati u prostor u kojem akumulacija može biti opasna. Ispuštanje velikih količina ugljikova dioksida u atmosferu nastaje učinak staklenika.



**Slika 4.24.** Lanci fizikalnih efekata koncepta pranja rublja  $D^b$  (legenda: slika 4.8.)

Prema normama, ekološkim oznakama i deklaracijama o zaštiti okoliša, ugljikov dioksid nije otrovan plin, no pri visokim koncentracijama plina u neventiliranim prostorijama, izloženost plinu može uzrokovati gušenje i opasnosti za zdravlje. Vrednovanje ekološke prihvatljivosti sekundarnog efekta na okoliš *S.Ef7* (tablica 4.16.) provedeno je u skladu s navedenim podacima o štetnosti ugljikova dioksida pa je nečistoćama (koje su sekundarni efekt na okoliš) dodijeljena ocjena ekološke prihvatljivosti u iznosu -9.

Za koncept  $D^b$  karakteristične su promjene agregatnoga stanja ugljikova dioksida. Koncept  $D^b$  ima 3 promjene agregatnoga stanja tijekom materijala (slika 4.23.: funkcije *F13*,

*F14 i F15*). Koncepti  $D^b$  i  $D^a$  imaju jednak broj sekundarnih efekata na okoliš, no kod koncepta  $D^b$  proces pranja ugljikovim dioksidom kružni je proces. Pritom ugljikov dioksid prolazi više pretvorbi agregatnoga stanja te se ukapljuje radi pohrane i ponovne uporabe. Zbog toga je ekološka prihvatljivost sekundarnih efekata na okoliš koncepta  $D^b$  veća nego kod koncepta  $D^a$ .

**Tablica 4.16.** Pomoćna tablica za vrednovanje koncepta pranja rublja  $D^b$

Oznaka	Lanac fizikalnih efekata – vrednovanje prema kriteriju ekoeftivnosti pretvorbi energije i signala	Dobrota (zbroj)
<i>L1</i>	$E_E \rightarrow E_{EM} = (-0,19)$ ; $E_{EM} \rightarrow E_{Me} = (-0,68)$ ; $E_{Me} \rightarrow E_K = (0,28)$ ; $E_K \rightarrow E_{WT} = (-0,46)$ ; $E_{Me} \rightarrow E_H = (-0,38)$ .	-1,43
<i>L2</i>	$E_H \rightarrow E_{LH} = (-3,00)$ .	-3,00
<i>L3</i>	$E_{HoO} \rightarrow E_A = (0,09)$ ; $E_A \rightarrow E_{Ch} = (-0,87)$ ; $E_{Ch} \rightarrow E_{LCh} = (-1,22)$ . $E_A \rightarrow E_{LH} = (-3,96)$ .	-5,96
<i>L4</i>	$E_E \rightarrow E_{EM} = (-0,19)$ ; $E_{EM} \rightarrow E_{Me} = (-0,68)$ ; $E_{Me} \rightarrow E_{WT} = (-0,18)$ .	-1,05
<i>L5</i>	$E_E \rightarrow E_{EM} = (-0,19)$ ; $E_{EM} \rightarrow E_{Me} = (-0,68)$ ; $E_{Me} \rightarrow E_H = (-0,38)$ ; $E_H \rightarrow E_{LH} = (-3,00)$ .	-4,25
<i>L6</i>	$E_E \rightarrow E_{EM} = (-0,19)$ ; $E_{EM} \rightarrow E_{Me} = (-0,68)$ ; $E_{Me} \rightarrow E_K = (0,28)$ ; $E_K \rightarrow E_E = (0,49)$ .	-0,10
<b>Ukupno:</b>	~17 transformacija < 0; ~4 transformacije > 0.	-15,79
Oznaka	Sekundarni efekti na okoliš – vrednovanje prema kriteriju ekološke prihvatljivosti sekundarnih efekata na okoliš	Dobrota
<i>S.Ef1</i> ( $E_A$ )	tekući CO <sub>2</sub> , CO <sub>2</sub> plin (pohranjen) → indirektno odlaganje / ispuštanje otpada / emisija srednje toksičnosti = (-6)	-6
<i>S.Ef2</i> ( $E_{Me}$ )	vibracije → značajno malo otpada / emisija (mali utjecaji na okoliš) = (+9)	+9
<i>S.Ef3</i> ( $E_{WT}$ )	buka → direktno odlaganje / ispuštanje inertnog otpada / emisija srednje toksičnosti = (-7)	-7
<i>S.Ef4</i> ( $E_{LH}$ , $E_{LCh}$ )	latentna toplinska, latentna kemijska energija (rublje) → indirektno odlaganje / ispuštanje inertnog otpada / emisija niske toksičnosti = (-2)	-2
<i>S.Ef5</i> ( $E_A$ )	CO <sub>2</sub> (plin) → direktno odlaganje/ispuštanje inertnog otpada/emisija srednje toksičnosti = (-7)	-7
<i>S.Ef6</i> ( $E_E$ )	statički elektricitet → odlaganje / ispuštanje otpada / emisija (znatni doprinos jednoj kategoriji utjecaja na okoliš) = (-4)	-4
<i>S.Ef7</i> ( $E_A$ , $E_{LCh}$ )	nečistoće → odlaganje / ispuštanje otpada / emisija visoke toksičnosti = (-9)	-9
<i>S.Ef8</i> ( $E_A$ , $E_K$ )	zrak (kinetička energija) → značajno malo otpada / emisija (mali utjecaji na okoliš) = (+9)	+9
<b>Ukupno:</b>	8 sekundarnih efekata na okoliš (2 <i>S.Ef</i> > 0; 6 <i>S.Ef</i> < 0).	-17

Oznake: *L1*, *L2*, ... *L6* – lanci fizikalnih efekata koncepta pranja rublja  $D^b$  (slika 4.24.), *S.Ef1*, *S.Ef2*, ..., *S.Ef8* – sekundarni (latentni) efekti na okoliš (slika 4.23.), tablica 4.5.: oznake oblika energije i signala.

#### 4.6.2. Vrednovanje predloženom metodom (koncepti A, B, C, D<sup>b</sup> i E)

Procedura ispitivanja konzistentnosti predložene metode osmišljena je po uzoru na ispitivanje validnosti metoda odlučivanja navedeno u literaturi [327]. U novoj matrici odlučivanja (tablica 4.17.) koncept D<sup>a</sup> zamijenjen je konceptom D<sup>b</sup>, što rezultira novim skupom koncepata pranja rublja (A, B, C, D<sup>b</sup> i E), ali i dodjeljivanjem novog ranga ekološke prihvatljivosti konceptima u skupu. Rezultati upućuju na to da nema promjene ranga koncepata koji su ekološki prihvatljiviji od koncepta D<sup>b</sup>, čime se potvrđuje konzistentnost tehnike rangiranja predloženom metodom.

**Tablica 4.17.** Matrica odlučivanja (koncepti pranja rublja A, B, C, D<sup>b</sup> i E)

Koncepti	Kriteriji ekološke prihvatljivosti $C_j$ , rang $e_{ij}$										
	$S_{\epsilon_{TR}}$ (maks.)	$e_{i1}$	$N_{\epsilon_{TR}}$ (min.)	$e_{i2}$	$S_{\epsilon_{EF}}$ (maks.)	$e_{i3}$	$N_{\epsilon_{EF}}$ (min.)	$e_{i4}$	$N_{Agr}$ (min.)	$e_{i5}$	$V_{eij}$
$\alpha$	-8,49	1	15	2	-7	4	5	2	1	2	11
$\beta$	-8,49	1	15	2	5	1	5	2	1	2	8
$\gamma$	-9,0	2	13	1	-1	2	3	1	0	1	7
$\delta^b$	-15,79	4	21	4	-17	5	8	4	2	3	20
$\epsilon$	-8,88	3	19	3	-2	3	7	3	1	2	14

Oznake:  $\alpha$  – koncept A,  $\beta$  – koncept B,  $\gamma$  – koncept C,  $\delta^b$  – koncept D<sup>b</sup>,  $\epsilon$  – koncept E,  $S_{\epsilon_{TR}}$  – ekoeftektivnost pretvorbi energije i signala,  $N_{\epsilon_{TR}}$  – broj pretvorbi energije i signala,  $S_{\epsilon_{TR}}$  – zbroj ekološke prihvatljivosti sekundarnih efekata na okoliš,  $N_{\epsilon_{EF}}$  – broj sekundarnih efekata na okoliš,  $N_{Agr}$  – broj promjena agregatnoga stanja materijala,  $V_{eij}$  – suma rangova  $e_{ij}$ , (maks.)/(min.) – maksimirajući ili minimizirajući kriterij ekološke prihvatljivosti.

Ekološka prihvatljivost koncepata pranja rublja vrednovana je i metodom procjene njihova životnog ciklusa. U metodološkom koraku istraživanja naziva *Ispitivanje konzistentnosti, učinkovitosti i primjenjivosti kriterija i metode vrednovanja ekološke prihvatljivosti za konceptualnu fazu razvoja tehničkih sustava*, rezultati studije slučaja vrednovanja ekološke prihvatljivosti i rezultati procjene životnog ciklusa koncepata pranja rublja usporedit će se s rezultatima vrednovanja kriterijima ekološke prihvatljivosti i predloženom metodom (6. poglavlje).

### 4.7. Primjena predložene metode na primjeru koncepata stolnog sata budilice

Bernstein i drugi [50] demonstrirali su primjenu *Function Impact Matrix – FIM* metode na primjeru triju koncepata stolnih satova budilica: mehaničkog sata budilice, elektroničkog

sata budilice s baterijom i mehaničko-digitalnog sata budilice s baterijom [52]. S obzirom na to da su Bernstein i drugi [50] proveli validaciju *FIM* metode, procjenu utjecaja na okoliš metodom *EcoIndicator 99* [328] i obrazložili zaključke o rekonstrukciji proizvoda na temelju studije slučaja u kojoj su sudjelovali konstruktori, ovi koncepti stolnog sata budilice odabrani su kao drugi skup testnih koncepata za demonstraciju primjene predložene metode.

U nastavku je provedeno vrednovanje triju koncepata stolnog sata budilice predloženom metodom vrednovanja ekološke prihvatljivosti. Analiza lanaca efekata i sekundarnih efekata na okoliš temelje se na funkcijskim dekompozicijama i listama materijala rabljenih u studiji Bernsteina i drugih [50]. Vrednovanje je provedeno za svaki koncept stolnog sata budilice, na temelju pet kriterija ekološke prihvatljivosti predloženih ovim istraživanjem. Vrednovanje prema kriterijima ekološke prihvatljivosti i rangiranje koncepata predloženom metodom zapisuje se u matrici odlučivanja.

Predložena metoda vrednovanja ekološke prihvatljivosti koncepata provodi se prema koracima vrednovanja (tablica 4.3.). Procedura vrednovanja ekološke prihvatljivosti koncepta zahtijeva generiranje lanaca fizikalnih efekata te identificiranje sekundarnih efekata na okoliš.

Lanci fizikalnih efekata svakog koncepta i vrednovanje prema kriterijima ekološke prihvatljivosti zapisuju se u pomoćnoj tablici svakog koncepta radi lakšeg izračuna rangova vrednovanja prema kriterijima ekološke prihvatljivosti. Zatim se u pomoćnoj tablici svakog koncepta zapisuju sekundarni efekti na okoliš, kao i njihovo vrednovanje prema kriterijima ekološke prihvatljivosti sekundarnih efekata na okoliš i broja sekundarnih efekata na okoliš.

Pomoćna tablica služi za zapisivanje podataka potrebnih za vrednovanje ekološke prihvatljivosti prema pet kriterija ekološke prihvatljivosti, a sa svrhom sistematiziranja koraka procedure vrednovanja predloženom metodom. Kako bi se maksimirala usporedivost koncepata, lanaca fizikalnih efekata i sekundarnih efekata na okoliš pojedinih koncepata, predlažu se iteracije pri generiranju lanaca efekata i provjera dodijeljenih vrijednosti dobrote. To je stoga što predložena metoda zahtijeva:

- istodobno razmatranje i vrednovanje više od jednog koncepta
- generiranje lanaca fizikalnih efekata radi identifikacije transformacija energije, materijala i signala
- dodjeljivanje vrijednosti ekološke prihvatljivosti sekundarnih efekata na okoliš vodeći se pritom vrijednosnom ljestvicom za ocjenjivanje dobrote sekundarnih efekata na okoliš (tablica 4.8.).

Vrednovanje prema kriteriju ekoefektivnosti pretvorbi energije i signala sastoji se od definiranja ulaznog i izlaznog oblika energije na osnovi generiranih lanaca fizikalnih efekata svakog koncepta. Teorijska ekoefektivnost pretvorbe energije i signala dodjeljuje se svakoj transformaciji ulazne u izlazni oblik energije ili signala kojima se realiziraju lanci efekata. Tablica 4.6. prikazuje teorijske ekoefektivnosti pretvorbe energije i signala.

U pripadajućoj pomoćnoj tablici koncepta zapisuju se parcijalne teorijske ekoefektivnosti pretvorbi energije i signala, kao i njihov zbroj koji čini ukupnu ekoefektivnost pretvorbi energije i signala koncepta. Ekološka prihvatljivost prema kriteriju broja pretvorbi energije i signala računa se prebrojavanjem pretvorbi energije i signala čija je teorijska ekoefektivnost različita od nule, tj. prebrojavanjem pretvorbi pri kojima postoji transformacija ulaznog oblika energije u izlazni oblik energije.

U drugom dijelu pomoćne tablice zapisuju se podatci potrebni za vrednovanje ekološke prihvatljivosti na temelju kriterija ekološke prihvatljivosti sekundarnih efekata na okoliš i kriterija broja sekundarnih efekata na okoliš. Ocjena ekološke prihvatljivosti pojedinoga sekundarnog efekta na okoliš dodjeljuje se prema tablici 4.8. Kriterij ekološke prihvatljivosti sekundarnih efekata na okoliš temelji se na zbroju parcijalnih ocjena sekundarnih efekata na okoliš koncepta. Vrednovanje prema kriteriju broja sekundarnih efekata na okoliš je prebrojavanje sekundarnih efekata na okoliš koncepta.

U nastavku su prikazani lanci efekata i sekundarni efekti na okoliš triju koncepata stolnog sata budilice te pomoćne tablice za vrednovanje ekološke prihvatljivosti tih koncepata. Nakon vrednovanja prema kriterijima ekološke prihvatljivosti definiranih ovim istraživanjem, u matrici odlučivanja sažimaju se podatci potrebni za dodjeljivanje rangova parcijalnim vrednovanjima prema pojedinim kriterijima ekološke prihvatljivosti i konačni rezultati rangiranja nakon agregiranja vrednovanja prema kriterijima ekološke prihvatljivosti.

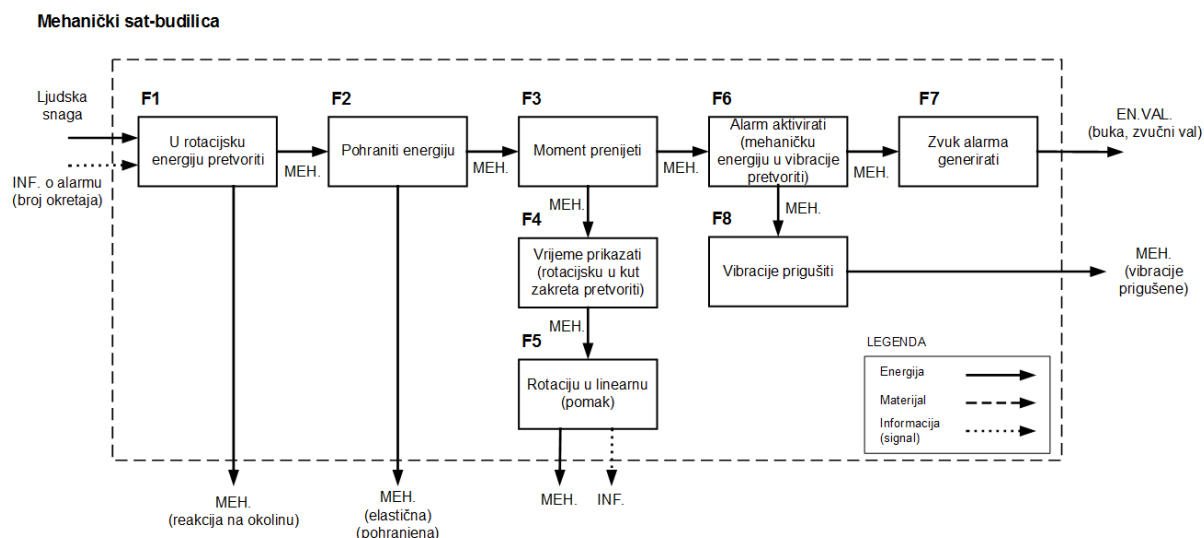
Analizirani su koncepti mehaničkog, mehaničko-digitalnog i digitalnog sata budilice.

##### 4.7.1. Koncept mehaničkog sata budilice

Mehanički sat je uređaj koji se koristi mehaničkim mehanizmom za mjerenje protoka vremena, prikazivanje trenutnog vremena te po potrebi namještanje i pokretanje alarma u zadanome vremenu. U urarstvu razlikujemo tri vrste mehanizama. Mehanizmi mogu biti potpuno mehanički (koncept mehaničkog sata budilice), potpuno elektronički bez pokretnih dijelova (koncept digitalnog sata budilice) ili kombinacija tih dvaju tipova mehanizama (koncept mehaničko-digitalnog sata budilice). U nastavku je objašnjen način rada mehaničkog



sata budilice u svrhu razumijevanja lanaca efekata i sekundarnih efekata na okoliš mehaničkog sata budilice. Slika 4.25. prikazuje funkcijsku strukturu mehaničkog sata budilice.



**Slika 4.25.** Funkcijska struktura mehaničkog sata budilice

Slika 4.26. je legenda oznaka lanaca fizikalnih efekata koncepata sata budilice. Slika 4.27. prikazuje lance fizikalnih efekata i sekundarne efekte na okoliš.

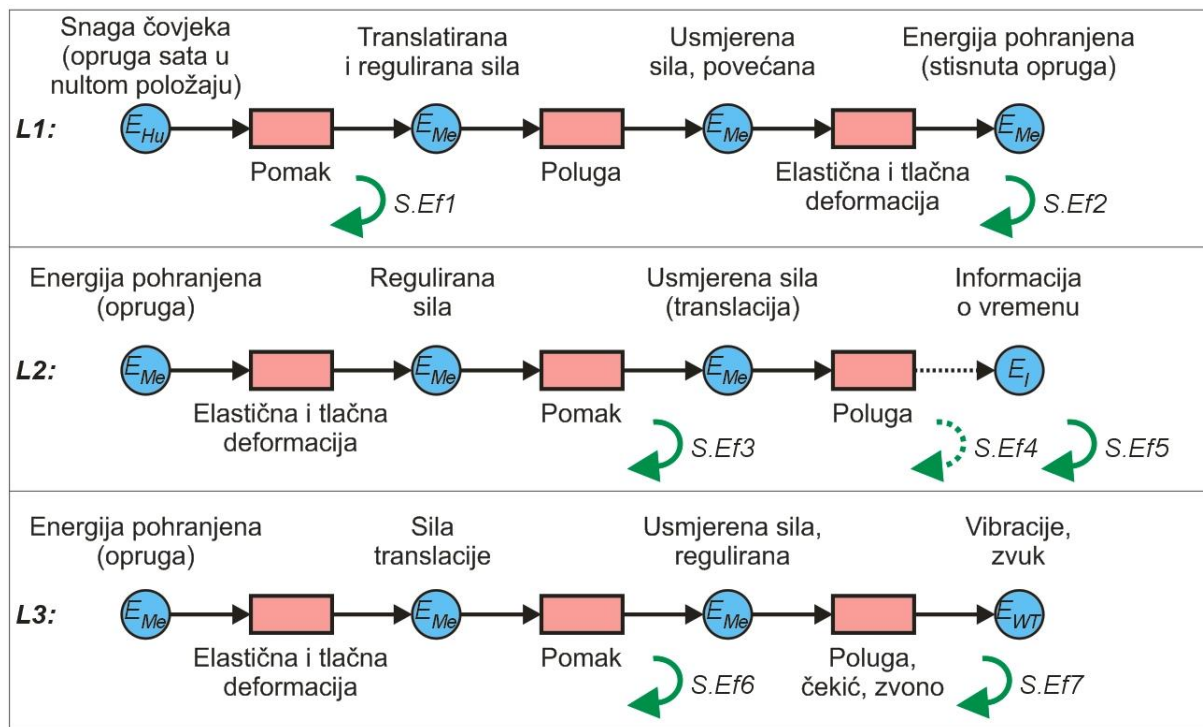
Oznaka	Značenje	Oznaka	Značenje	Oznaka	Značenje
	Ulazno ili izlazno stanje operanda (oblik energije)		Energija		Sekundarni efekt prema okolišu (tok energije)
	Fizikalni efekt (fizikalni zakon)		Materijal		Sekundarni efekt prema okolišu (tok materijala)
	Sekundarni efekt prema okolišu (oblik energije)		Signal		Sekundarni efekt prema okolišu (tok signala)

**Slika 4.26.** Legenda oznaka lanaca fizikalnih efekata koncepata sata budilice

Mehanički sat budilica sastoji se od krunice sata (služi za namještanje trenutnog vremena i vremena alarma), brojčanika, satne, minutne i sekundne kazaljke sata, kućišta sata te mehaničkog mehanizma. Mehanizam mehaničkog sata budilice sastoji se od nekoliko zupčanika, poluga, spojki i opruga. Glavna satna opruga mora se periodično navijati preko krunice sata kako bi satu osigurala potrebnu pokretačku energiju.

Lanac efekata koji opisuje energetske transformacije zbog pretvorbe čovjekove energije u rotacijsku energiju, pomak preko poluge te elastičnu deformaciju opruge ima oznaku *L1* (tablica 4.18.). Vrednovanje prema kriteriju ekoefektivnosti pretvorbi energije i signala,

kriteriju broja pretvorbi energije i signala, kriteriju ekološke prihvatljivosti sekundarnih efekata na okoliš i kriteriju broj sekundarnih efekata na okoliš prikazano je u pomoćnoj tablici koncepta (tablica 4.18.).

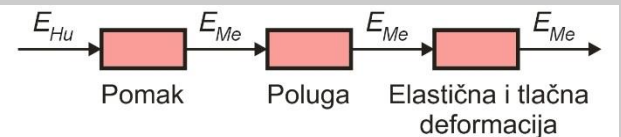
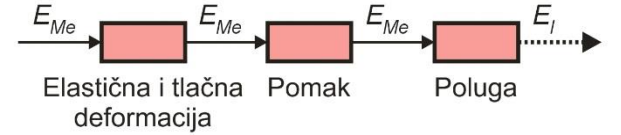
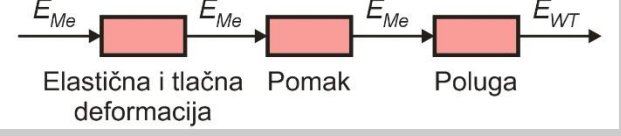


**Slika 4.27.** Lanci fizikalnih efekata i sekundarni efekti na okoliš koncepta mehaničkog sata budilice (legenda: slika 4.26.)

Sila u opruzi prenosi se preko niza zupčanika koji napajaju nemirnicu, tj. balansni kotačić koji konstantnom brzinom oscilira naprijed-natrag [329]. Svakim pokretom nemirnice mehanička poluga pokreće zupčanike u jednome smjeru, što kazaljke sata pomiče unaprijed [329]. Pomicanje zupčanika upravlja satnom, minutnom i sekundnom kazaljkom sata koje preko brojčanika sata prikazuju informaciju o vremenu. Pritom, transformacije energije u lancu efekata s oznakom *L2* jesu pretvorba mehaničke energije u signal (informaciju o trenutačnom vremenu). Pokretanje zupčanika proizvodi specifičan zvuk „kucanja“ [329], što je sekundarni efekt na okoliš (tablica 4.18.: *S.Ef5*).

Pretvorbe mehaničke u mehaničku energiju česte su u lancima efekata kod mehaničkog sata budilice. Teorijska ekoeftektivnost tih pretvorbi jednaka je 0 pa su te transformacije neutralne glede ekološke prihvatljivosti. Ekološki nepovoljne pretvorbe jesu one pri kojima je teorijska ekoeftektivnost pretvorbi energije ili signala manja od 0.

**Tablica 4.18.** Pomoćna tablica za vrednovanje mehaničkog sata budilice

Oznaka	Lanac fizikalnih efekata – vrednovanje prema kriteriju ekoefektivnosti pretvorbi energije i signala	Dobrota (zbroj)
<i>L1</i>	 <p><math>E_{Hu} \rightarrow E_{Me} = -4,94; E_{Me} \rightarrow E_{Me} = 0; E_{Me} \rightarrow E_{Me} = 0.</math></p>	-4,94
<i>L2</i>	 <p><math>E_{Me} \rightarrow E_{Me} = 0; E_{Me} \rightarrow E_{Me} = 0; E_{Me} \rightarrow E_l = 8,24.</math></p>	+8,24
<i>L3</i>	 <p><math>E_{Me} \rightarrow E_{Me} = 0; E_{Me} \rightarrow E_{Me} = 0; E_{Me} \rightarrow E_{WT} = -0,18.</math></p>	-0,18
<b>Ukupno:</b>	~6 transformacija = 0; 2 transformacije < 0; 1 transformacija > 0.	3,12
Oznaka	Sekundarni efekti na okoliš – vrednovanje prema kriteriju ekološke prihvatljivosti sekundarnih efekata na okoliš	Dobrota
<i>S.Ef1</i> ( $E_{Me}$ )	značajno malo otpada / emisija (mali utjecaji na okoliš) → (+9)	+9
<i>S.Ef2</i> ( $E_{Me}$ )	Ponovna uporaba otpada / emisija (ili ostvarivo uz manje izmjene) → (+7)	+7
<i>S.Ef3</i> ( $E_{Me}$ )	značajno malo otpada / emisija (mali utjecaji na okoliš) → (+9)	+9
<i>S.Ef4</i> ( $E_l$ )	nema otpada / emisija → (+10)	+10
<i>S.Ef5</i> ( $E_{WT}$ )	značajno malo otpada / emisija (mali utjecaji na okoliš) → (+9)	+9
<i>S.Ef6</i> ( $E_{Me}$ )	značajno malo otpada / emisija (mali utjecaji na okoliš) → (+9)	+9
<i>S.Ef7</i> ( $E_{WT}$ )	značajno malo otpada / emisija (mali utjecaji na okoliš) → (+9)	+9
<b>Ukupno:</b>	7 sekundarnih efekata na okoliš (7 <i>S.Ef</i> > 0; 0 <i>S.Ef</i> < 0).	61

Oznake: *L1*, *L2*, *L3* – lanci fizikalnih efekata mehaničkog sata budilice (slika 4.27.), *S.Ef1*, *S.Ef2*, ... *S.Ef7* – sekundarni (latentni) efekti na okoliš (slika 4.27.), tablica 4.5.: oznake oblika energije i signala.

Na slici 4.27. i u pomoćnoj tablici koncepta mehaničkog sata budilice (tablica 4.18.) prikazane su transformacije energije pri kojima postoji promjena ulaznog u izlazni oblik energije. Riječ je o pretvorbi čovjekove snage u mehaničku energiju (slika 4.27.: lanac efekata *L1*) te o pretvorbi mehaničke energije u buku, tj. akustičnu energiju potrebnu za generiranje zvuka alarma (slika 4.27.: lanac efekata *L3*).

Buka se klasificira kao energija valova ( $E_{WT}$ ). Kada je buka sekundarni efekt na okoliš (slika 4.27.: lanac efekata *L2*), vrednuje se prema kriteriju ekološke prihvatljivosti sekundarnih efekata na okoliš (tablica 4.8.). Pretvorba mehaničke energije u signal (slika

4.27.: lanac efekata  $L_2$ ) ekološki je prihvatljiva transformacija jer je koeficijent teorijske ekoefektivnosti te transformacije veći od 0. Tablica 4.6. prikazuje koeficijente teorijske ekoefektivnosti energije i signala. Time je omogućeno da konstruktor tijekom vrednovanja ima uvid u koeficijente teorijske ekoefektivnosti pretvorbi energije i signala te u kombinaciji mogućih pretvorbi oblika energije i signala, čime se nastojalo optimirati vrijeme potrebno za vrednovanje ekološke prihvatljivosti prema ovom kriteriju. Broj pretvorbi u kojima postoji pretvorba ulaznog u izlazni oblik energije koncepta mehaničkog sata budilice iznosi 3.

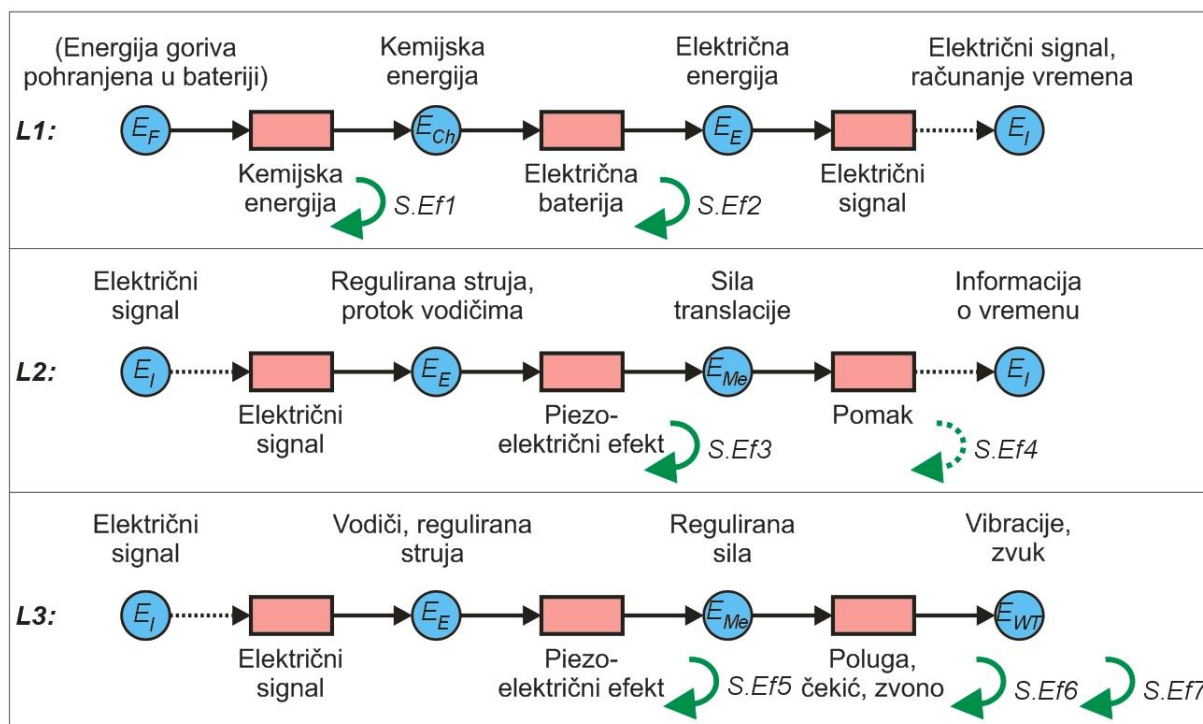
U pomoćnoj tablici (tablica 4.18.) zabilježeno je 7 sekundarnih efekata na okoliš. Ocjene ekološke prihvatljivosti dodjeljuju se prema vrijednosnoj ljestvici za vrednovanje prema kriteriju ekološke prihvatljivosti sekundarnih efekata na okoliš (tablica 4.8.).

U slučaju sekundarnih efekata na okoliš, a to su vibracije ili buka (slika 4.27.: *S.Ef1*, *S.Ef3*, *S.Ef5*, *S.Ef6*, *S.Ef7*), dodijeljene su visoke ocjene ekološke prihvatljivosti (+9) zbog veoma malo otpada i emisija koje ti sekundarni efekti uzrokuju. Ocjena ekološke prihvatljivosti sekundarnog efekta koji je po vrsti informacija (slika 4.27.: *S.Ef4* – prikaz trenutačnoga vremena preko kazaljki i brojčanika sata) vrednovan je kao izrazito ekološki povoljan (+10) jer ne uzrokuje neposredne sekundarne efekte na okoliš. U slučaju sekundarnog efekta na okoliš koji označuje pohranjenu mehaničku (elastičnu) energiju (*S.Ef2*), ekološka prihvatljivost sekundarnog efekta nešto je niža nego kod ostalih sekundarnih efekata ovog koncepta (ocjena 7), no i dalje je riječ o relativno visokoj ekološkoj prihvatljivosti ovoga sekundarnog efekta na okoliš.

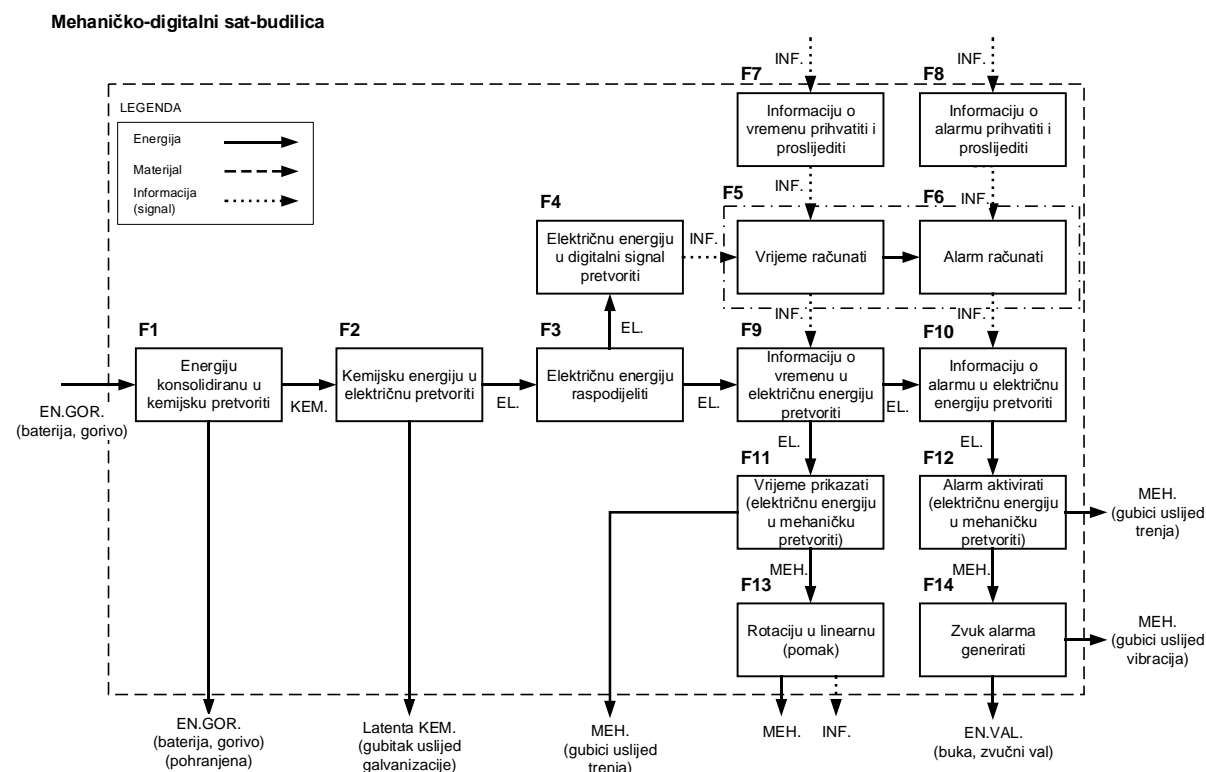
Zaključci o ekološkoj prihvatljivosti koncepta koji se vrednuju predloženom metodom mogu se donijeti tek nakon generiranja lanaca efekata, identificiranja sekundarnih efekata na okoliš i popunjavanja pomoćnih tablica svih koncepta iz skupa razmatranih koncepta. To je stoga što, iako parcijalne, ocjene ekološke prihvatljivosti mogu upućivati na ekološki prihvatljiv koncept, metoda vrednovanja ekološke prihvatljivosti relativna je metoda te time upućuje na ekološku prihvatljivost koncepta relativno s obzirom na ostale koncepte u skupu vrednovanih koncepta.

#### 4.7.2. Koncept mehaničko-digitalnog sata budilice

Slika 4.28. prikazuje lance fizikalnih efekata i sekundarne efekte na okoliš koncepta mehaničko-digitalnog sata budilice.



**Slika 4.28.** Lanci fizikalnih efekata i sekundarni efekti na okoliš koncepta mehaničko-digitalnog sata budilice (legenda: slika 4.26.)

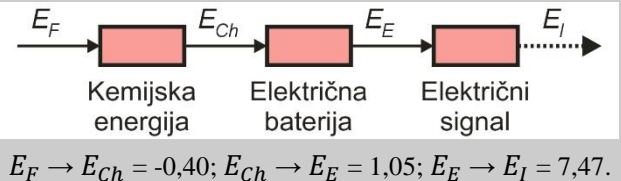
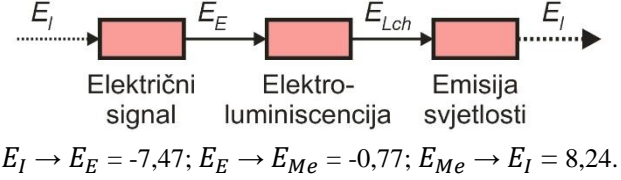
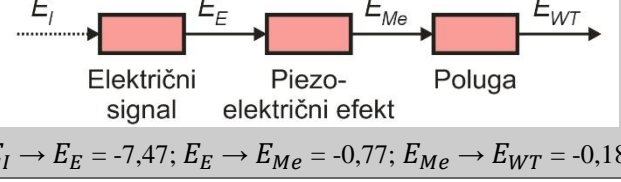


**Slika 4.29.** Funkcijska struktura mehaničko-digitalnog sata budilice

Kao i kod mehaničkog sata budilice, nema promjena agregatnoga stanja materijala (slika 4.29.). Ekološki nepovoljne pretvorbe jesu pretvorba energije pohranjene u bateriji sata

budilice u kemijsku energiju (slika 4.28.: lanac efekata  $L1$ ), pretvorbe signala u električnu energiju (slika 4.28.: lanci efekata  $L2$  i  $L3$ ) te pretvorba mehaničke energije u energiju valova (slika 4.28.: lanac efekata  $L3$ ). Za okoliš prihvatljive pretvorbe jesu transformacija kemijske u električnu energiju (slika 4.28.: lanac efekata  $L1$ ), pretvorba električne energije u signal (slika 4.28.: lanac efekata  $L1$ ), pretvorbe električne u mehaničku energiju (slika 4.28.: lanci efekata  $L2$  i  $L3$ ) te pretvorba mehaničke energije u signal (slika 4.28.: lanac efekata  $L2$ ).

**Tablica 4.19.** Pomoćna tablica za vrednovanje mehaničko-digitalnog sata budilice

Oznaka	Lanac fizikalnih efekata – vrednovanje prema kriteriju ekoeftektivnosti pretvorbi energije i signala	Dobrota (zbroj)
$L1$	 <p><math>E_F \rightarrow E_{Ch} = -0,40</math>; <math>E_{Ch} \rightarrow E_E = 1,05</math>; <math>E_E \rightarrow E_I = 7,47</math>.</p>	+8,12
$L2$	 <p><math>E_I \rightarrow E_E = -7,47</math>; <math>E_E \rightarrow E_{Me} = -0,77</math>; <math>E_{Me} \rightarrow E_I = 8,24</math>.</p>	0
$L3$	 <p><math>E_I \rightarrow E_E = -7,47</math>; <math>E_E \rightarrow E_{Me} = -0,77</math>; <math>E_{Me} \rightarrow E_{WT} = -0,18</math>.</p>	-8,42
<b>Ukupno:</b>	6 transformacija < 0; 3 transformacije > 0.	-0,3
Oznaka	Sekundarni efekti na okoliš – vrednovanje prema kriteriju ekološke prihvatljivosti sekundarnih efekata na okoliš	Dobrota
$S.Ef1 (E_F)$	odlaganje / ispuštanje otpada / emisija (znatan doprinos više kategorija utjecaja na okoliš) $\rightarrow (-8)$	-8
$S.Ef2 (E_{Lch})$	ponovna uporaba otpada / emisija (ili ostvarivo uz manje izmjene) $\rightarrow (-6)$	-6
$S.Ef3 (E_{Me})$	značajno malo otpada / emisija (mali utjecaji na okoliš) $\rightarrow (+9)$	+9
$S.Ef4 (E_I)$	nema otpada / emisija $\rightarrow (+10)$	+10
$S.Ef5 (E_{Me})$	značajno malo otpada / emisija (mali utjecaji na okoliš) $\rightarrow (+9)$	+9
$S.Ef6 (E_{WT})$	značajno malo otpada / emisija (mali utjecaji na okoliš) $\rightarrow (+9)$	+9
$S.Ef7 (E_{Me})$	značajno malo otpada / emisija (mali utjecaji na okoliš) $\rightarrow (+9)$	+9
<b>Ukupno:</b>	7 sekundarnih efekata na okoliš (7 $S.Ef > 0$ ; 0 $S.Ef < 0$ ).	32

Oznake:  $L1$ ,  $L2$ ,  $L3$  – lanci fizikalnih efekata mehaničko-digitalnog sata budilice (slika 4.28.),  $S.Ef1$ ,  $S.Ef2$ , ...  $S.Ef7$  – sekundarni (latentni) efekti na okoliš (slika 4.28.), tablica 4.5.: oznake oblika energije i signala.

U pomoćnoj tablici (tablica 4.19.) prikazani su vrednovanje prema kriteriju ekoefektivnosti pretvorbi energije i signala za lance fizikalnih efekata koncepta mehaničko-digitalnog sata budilice te izračun dobrote za vrednovanje prema kriteriju broja pretvorbi energije i signala, kriteriju ekološke prihvatljivosti sekundarnih efekata na okoliš te kriteriju broja sekundarnih efekata na okoliš.

Ukupna teorijska ekoefektivnost pretvorbi energija koncepta mehaničko-digitalnog sata budilice izračunava se zbrajanjem teorijskih ekoefektivnosti pretvorbi oblika energije i signala koncepta (tablica 4.6.). Kako je teorijska ekoefektivnost pretvorbi oblika energije koncepta mehaničko-digitalnog sata budilice manja nego kod koncepta mehaničkog sata budilice, može se zaključiti da je ekološka prihvatljivost ovog koncepta prema kriteriju ekoefektivnosti pretvorbi energije i signala manja od ekološke prihvatljivosti koncepta mehaničkog sata budilice.

Broj pretvorbi energije i signala u neki drugi oblik energije koncepta mehaničko-digitalnog sata budilice iznosi 9, što je više nego kod koncepta mehaničkog sata budilice. Vrednovanje prema ovom kriteriju upućuje da je mehaničko-digitalni koncept sata budilice nepovoljniji za okoliš od mehaničkog sata budilice.

U pomoćnoj tablici mehaničko-digitalnog sata budilice zabilježeno je 7 sekundarnih efekata na okoliš (tablica 4.19.). Ocjene ekološke prihvatljivosti efektima dodijeljene su prema vrijednosnoj ljestvici za vrednovanje prema kriteriju ekološke prihvatljivosti sekundarnih efekata na okoliš (tablica 4.8.).

Četiri sekundarna efekta na okoliš koji uključuju vibracije ili trenje jesu mehanička energija prema obliku energije. Sekundarnim su efektima dodijeljene ocjene ekološke prihvatljivosti u iznosu 9 zbog značajno malo otpada i emisija. Sekundarni efekti na okoliš koji su po vrsti informacija ili signal vrednovani su kao ekološki prihvatljivi. Sekundarni efekt na okoliš koji nastaje zbog pretvorbe kemijske u električnu energiju (električna baterija) po vrsti je klasificiran kao latentna kemijska energija. Ovom sekundarnom efektu dodijeljena je ocjena -6 te je time vrednovan kao ekološki neprihvatljiv.

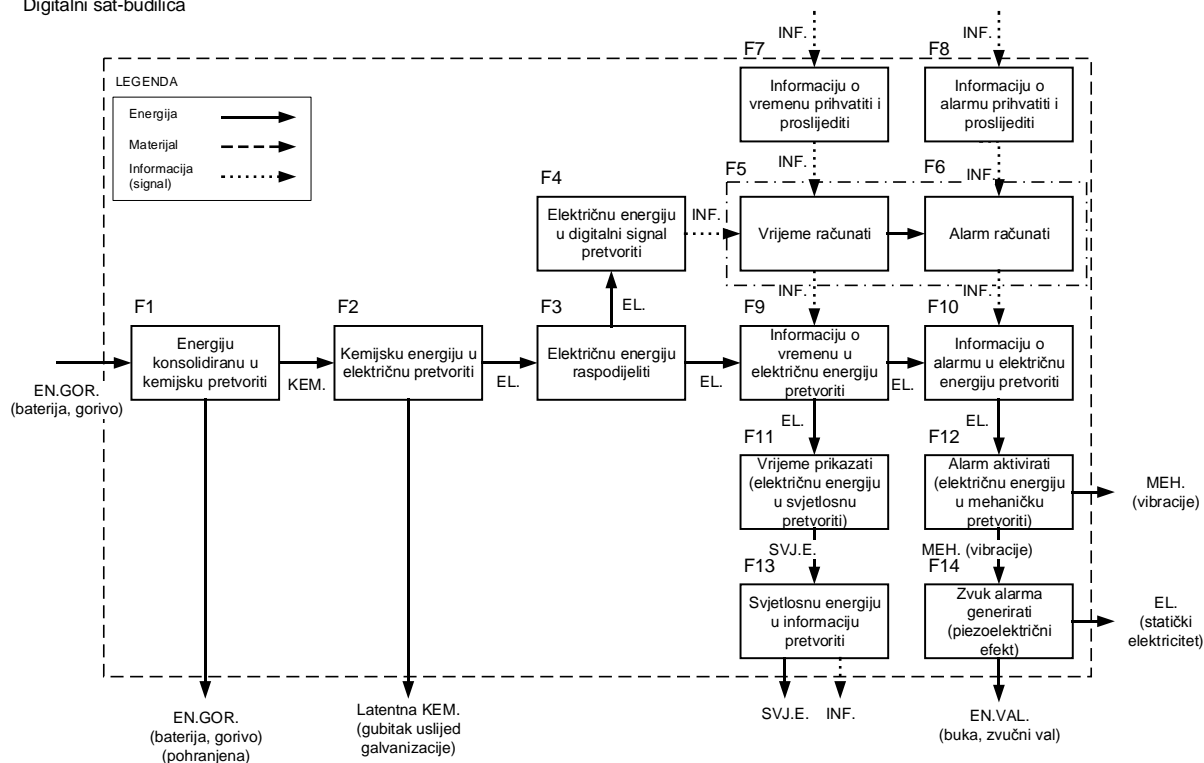
Energija pohranjena u bateriji sata budilice klasificirana je kao energija goriva, a ovom sekundarnom efektu na okoliš dodijeljena je ocjena ekološke prihvatljivosti -8. Ukupna ekološka prihvatljivost sekundarnih efekata na okoliš zbroj je parcijalnih ocjena ekološke prihvatljivosti. Taj je zbroj veći kod mehaničkog sata budilice nego kod mehaničko-digitalnog sata budilice. Moguće je zaključiti da je koncept mehaničkog sata budilice ekološki

prihvatljiviji od koncepta mehaničko-digitalnog sata budilice prema kriteriju ekološke prihvatljivosti sekundarnih efekata na okoliš. Vrednovanje prema kriteriju broja sekundarnih efekata na okoliš također upućuje na to da je koncept mehaničkog sata budilice ekološki prihvatljiviji od koncepta mehaničko-digitalnog sata budilice.

#### 4.7.3. Koncept digitalnog sata budilice

Kod koncepta digitalnog sata budilice postoje dvije pretvorbe energije kojih nema u konceptima mehaničkog i mehaničko-digitalnog sata budilice. To su pretvorba električne energije u latentnu kemijsku energiju i pretvorba električne energije u svjetlosnu energiju (slika 4.30.).

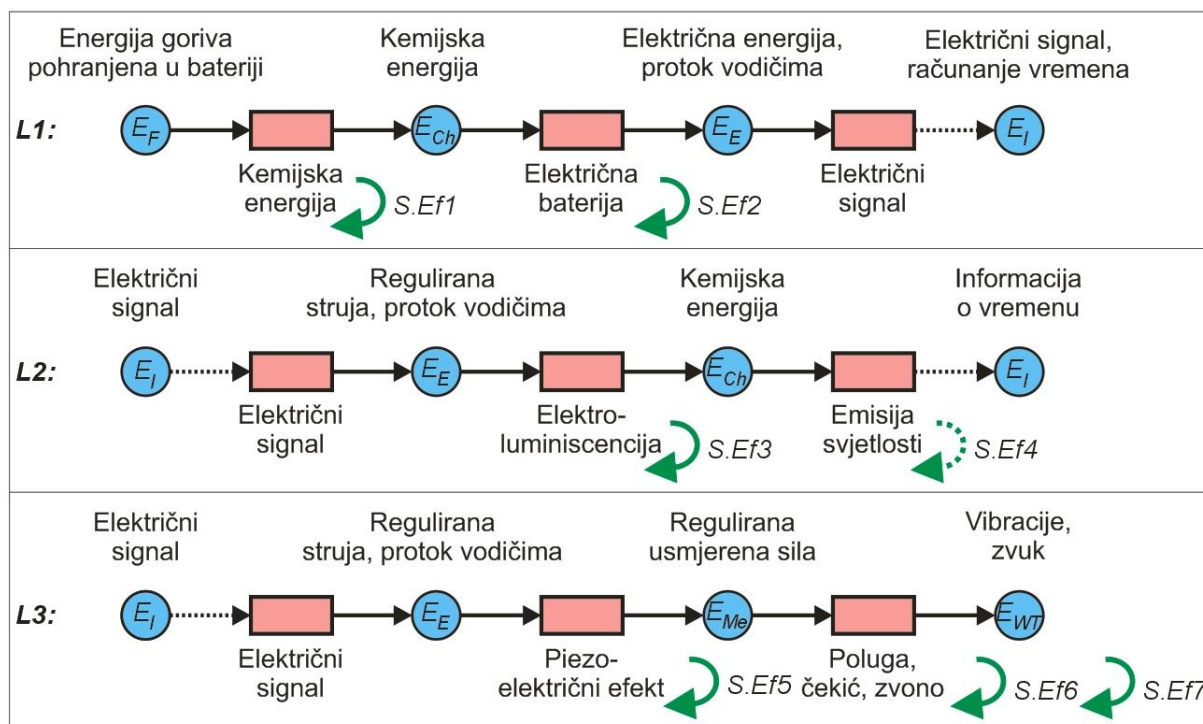
Digitalni sat-budilica



Slika 4.30. Funkcijska struktura digitalnog sata budilice

Slika 4.31. prikazuje lance fizikalnih efekata i sekundarne efekti na okoliš koncepta digitalnog sata budilice. Fizikalni efekti koncepta digitalnog sata budilice razlikuju se od fizikalnih efekata mehaničko-digitalnog sata budilice u pretvorbi oblika energije koja je potrebna za ostvarivanje lanca efekata *L2* te sekundarnim efektima na okoliš *S.Ef2*, *S.Ef3* i *S.Ef7*.





**Slika 4.31.** Lanci fizikalnih efekata i sekundarni efekti na okoliš koncepta digitalnog sata budilice (legenda: slika 4.26.)

Teorijska ekoeftektivnost pretvorbe električne energije u latentnu kemijsku energiju i električne energije u svjetlosnu energiju ima negativan predznak. Zbog toga je i ukupna teorijska ekoeftektivnost pretvorbi energije i signala koncepta digitalnog sata budilice manja nego kod konceptata mehaničkog i mehaničko-digitalnog sata budilice. U pomoćnoj tablici koncepta digitalnog sata budilice izračunan je broj pretvorbi oblika energije i signala te iznosi 10 (tablica 4.20.).

Ekološka prihvatljivost sekundarnih efekata na okoliš manja je nego kod koncepta mehaničko-digitalnog sata budilice zbog sekundarnog efekta statičkog elektriciteta koji nastaje zbog piezoelektričnog efekta kojim se ostvaruje generiranje zvuka alarma (slika 4.31.: lanac efekata  $L3$ , sekundarni efekt na okoliš  $S.Ef7$ ). Iako koncept mehaničko-digitalnog sata budilice i digitalnog sata budilice imaju jednak broj sekundarnih efekata na okoliš, ekološka prihvatljivost sekundarnih efekata na okoliš bolja je kod mehaničko-digitalnog koncepta sata budilice.

**Tablica 4.20.** Pomoćna tablica za vrednovanje digitalnog sata budilice

Oznaka	Lanac fizikalnih efekata – vrednovanje prema kriteriju ekoefektivnosti pretvorbi energije i signala	Dobrota (zbroj)
<i>L1</i>	<p><math>E_F \rightarrow E_{Ch} = -0,40; E_{Ch} \rightarrow E_E = 1,05; E_E \rightarrow E_I = 7,47.</math></p>	8,12
<i>L2</i>	<p><math>E_I \rightarrow E_E = -7,47; E_E \rightarrow E_{LCh} = -2,28; E_{LCh} \rightarrow E_I = 9,74.</math></p>	-0,28
<i>L3</i>	<p><math>E_I \rightarrow E_E = -7,47; E_E \rightarrow E_{Me} = -0,77; E_{Me} \rightarrow E_{WT} = -0,18.</math></p>	-8,42
<b>Ukupno:</b>	6 transformacija < 0; 3 transformacije > 0.	-0,58
Oznaka	Sekundarni efekti na okoliš – vrednovanje prema kriteriju ekološke prihvatljivosti sekundarnih efekata na okoliš	Dobrota
<i>S.Ef1</i> ( $E_F$ )	odlaganje / ispuštanje otpada / emisija (znatan doprinos više kategorija utjecaja na okoliš) → (-8)	-8
<i>S.Ef2</i> ( $E_{LCh}$ )	ponovna uporaba otpada / emisija (ili ostvarivo uz manje izmjene) → (-6)	-6
<i>S.Ef3</i> ( $E_{LCh}$ )	značajno malo otpada / emisija (mali utjecaji na okoliš) → (+9)	+9
<i>S.Ef4</i> ( $E_I$ )	nema otpada / emisija → (+10)	+10
<i>S.Ef5</i> ( $E_{WT}$ )	značajno malo otpada / emisija (mali utjecaji na okoliš) → (+9)	+9
<i>S.Ef6</i> ( $E_{Me}$ )	značajno malo otpada / emisija (mali utjecaji na okoliš) → (+9)	+9
<i>S.Ef7</i> ( $E_E$ )	Odlaganje / ispuštanje otpada / emisija (znatan doprinos jednoj kategoriji utjecaja na okoliš) → (-4)	-4
<b>Ukupno:</b>	7 sekundarnih efekata na okoliš (4 <i>S.Ef</i> > 0; 3 <i>S.Ef</i> < 0).	19

Oznake: *L1*, *L2*, *L3* – lanci fizikalnih efekata digitalnog sata budilice (slika 4.31.), *S.Ef1*, *S.Ef2*, ... *S.Ef7* – sekundarni (latentni) efekti na okoliš (slika 4.31.), tablica 4.5.: oznake oblika energije i signala.

#### 4.7.4. Vrednovanje koncepata stolnog sata budilice predloženom metodom

Rezultati vrednovanja prema istraživanjem predloženih pet kriterija ekološke prihvatljivosti sažeti su u matrici odlučivanja u kojoj se provodi rangiranje triju koncepata sata budilice, prvo prema svakom od kriterija ekološke prihvatljivosti, a zatim s obzirom na cjelokupnu ocjenu ekološke prihvatljivosti. Rezultati upućuju na to da je koncept mehaničkog

sata budilice ekološki prihvatljivija alternativa pri usporedbi s mehaničko-digitalnim i digitalnim konceptom stolnog sata budilice (tablica 4.21.).

Budući da kod konceptata stolnog sata budilice nema transformacija koje upućuju na pretvorbu agregatnoga stanja materijala, sva su tri koncepta ocijenjena najvišom ocjenom prema ovom kriteriju. Ocjene prema kriteriju ekoeftektivnosti pretvorbi energije i signala, kriteriju broja pretvorbi energije i signala te kriteriju ekološke prihvatljivosti sekundarnih efekata na okoliš imaju najveći utjecaj na rangiranje konceptata u ovom ilustrativnom primjeru primjene predložene metode.

**Tablica 4.21.** Matrica odlučivanja predloženom metodom (koncepti stolnog sata budilice)

Koncepti	Kriteriji ekološke prihvatljivosti $C_j$ , rang $e_{ij}$										
	$S_{\epsilon_{TR}}$ (maks.)	$e_{i1}$	$N_{\epsilon_{TR}}$ (min.)	$e_{i2}$	$S_{\epsilon_{EF}}$ (maks.)	$e_{i3}$	$N_{\epsilon_{EF}}$ (min.)	$e_{i4}$	$N_{Agr}$ (min.)	$e_{i5}$	$V_{eij}$
$\alpha$	3,12	1	3	1	61	1	7	1	0	1	5
$\beta$	-0,3	2	9	2	32	2	7	1	0	1	7
$\gamma$	-0,58	3	9	2	19	3	7	1	0	1	10

Oznake:  $\alpha$  – koncept mehaničkog sata budilice,  $\beta$  – koncept mehaničko-digitalnog sata budilice,  $\gamma$  – koncept digitalnog sata budilice,  $S_{\epsilon_{TR}}$  – ekoeftektivnost pretvorbi energije i signala (tablica 4.6.),  $N_{\epsilon_{TR}}$  – broj pretvorbi energije i signala,  $S_{\epsilon_{EF}}$  – zbroj ekološke prihvatljivosti sekundarnih efekata na okoliš (tablica 4.8.),  $N_{\epsilon_{EF}}$  – broj sekundarnih efekata na okoliš,  $N_{Agr}$  – broj promjena agregatnoga stanja materijala,  $V_{eij}$  – suma rangova  $e_{ij}$ , maks., min. – maksimirajući ili minimizirajući kriterij ekološke prihvatljivosti

Rezultati primjene predložene metode u svrhu rangiranja konceptata stolnog sata budilice mogu se usporediti su s rezultatima usporedbe ekološke prihvatljivosti *Function Impact Matrix* [50]. Rezultati vrednovanja rangiranjem predloženom metodom i metodom *FIM* [50] metodom jednaki su, odnosno rangiraju koncepte istim redoslijedom od ekološki povoljnijeg do ekološki nepovoljnijeg.

Bernstein i drugi [50] koristili su se *FIM* metodom kako bi vrednovali ekološku prihvatljivost istih konceptata. *FIM* metoda zahtijeva analizu konceptata i identificiranje glavnih funkcija i potfunkcija razmatranih konceptata te je definirano ukupno 8 funkcija i potfunkcija. Rezultati pokazuju da su utjecaji na okoliš za funkciju ‘alarm aktivirati’ najmanji kod koncepta mehaničkog sata budilice, a najveći kod koncepta mehaničko-digitalnog sata budilice. Utjecaji na okoliš za funkciju ‘kućište’ najveći su kod koncepta mehaničkog sata budilice, a najmanji kod koncepta mehaničko-digitalnog sata budilice. *FIM* metoda [50] pruža potporu rekonstrukciji proizvoda na način da omogućuje povezivanje utjecaja na okoliš proizvoda i njegovih funkcija. S obzirom na to da je za primjenu *FIM* metode potrebno

provesti procjenu životnog ciklusa proizvoda radi procjene utjecaja proizvoda na okoliš, *FIM* metoda je podatkovno i vremenski zahtjevnija od vrednovanja ekološke prihvatljivosti predloženom metodom.

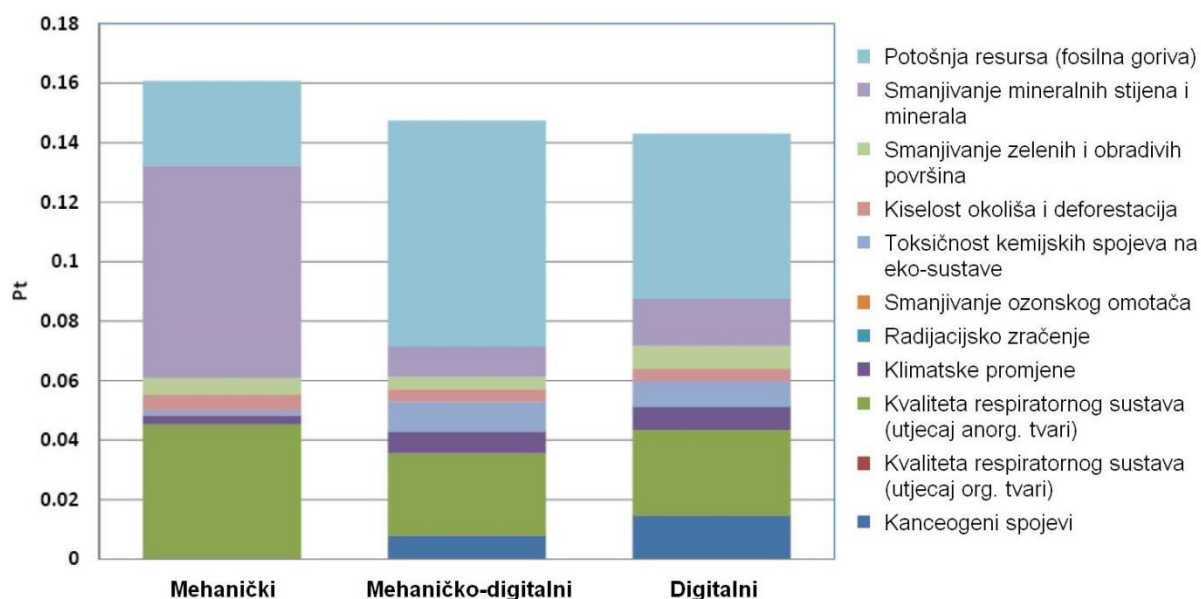
Na osnovi rezultata dobivenih *FIM* metodom, u studiji koju su proveli Bernstein i drugi [50] konstruktori su predložili novi, ‘hibridni’ koncept stolnog sata budilice čiji je temeljni koncept ekološki najprihvatljiviji koncept mehaničkog sata budilice. Konstruktori su predložili zamjenu materijala kućišta i konstrukcije tog koncepta po uzoru na ekološki prihvatljivija parcijalna rješenja sporednih funkcija digitalnog sata budilice, što bi rezultiralo čak 7 puta manjim utjecajima na okoliš nego kod originalnog koncepta mehaničkog sata budilice. Zanimljivo otkriće u radu Bernsteina i drugih [50] jest da je na temelju analize *FIM* metodom omogućeno otkrivanje funkcija koje uzrokuju znatne utjecaje na okoliš i koje su time kandidati za poboljšanje i rekonstrukciju proizvoda.

Iako ukupni utjecaji na okoliš digitalnog sata budilice upućuju na ekološki prihvatljiviji koncept u usporedbi s mehaničkim satom budilicom, utjecaji na okoliš glavne funkcije ne upućuju na isti zaključak. Na osnovi toga konstruktori su zaključili da je potencijal za smanjivanje utjecaja na okoliš koncepta digitalnog sata budilice manji nego u slučaju mehaničkog sata budilice. Naime, najveći utjecaji na okoliš mehaničkog sata budilice upućivali su na nekoliko sporednih funkcija [330]. Stoga je za rješenje funkcije ‘zvuk alarma generirati’ predloženo parcijalno rješenje po uzoru na koncept digitalnog sata budilice, dok je za rješenje funkcije ‘vrijeme regulirati’ odabrano parcijalno rješenje koncepta mehaničkog sata budilice.

Predloženom je metodom ostvareno vrednovanje ekološke prihvatljivosti i rangiranje na osnovi pet kriterija ekološke prihvatljivosti koncepata proizvoda propisanih metodom. Rezultati rangiranja upućuju na rangiranje ekološke prihvatljivosti koncepata sljedećim redoslijedom od ekološki najprihvatljivijeg do ekološki najmanje prihvatljivog koncepta: mehanički sat budilica, mehaničko-digitalni sat budilica te zatim digitalni sat budilica. Rangiranje koncepta predloženom metodom istovjetno je rangiranju na temelju vrednovanja *FIM* metodom u radu Bernsteina i drugih [50].

Pretpostavimo li da su novi koncepti koji su predmet vrednovanja ekološke prihvatljivosti nastali na temelju već poznatih koncepata i referentnih proizvoda, informacije nužne za procjenu životnog ciklusa i zaključivanje o ekološki prihvatljivim konceptima mogu se pribaviti rastavljanjem proizvoda i uspoređivanjem s najboljima [52]. No, kao što je pokazano na primjeru primjene predložene metode vrednovanjem ekološke prihvatljivosti

koncepta pranja rublja, koncepti koje je potrebno vrednovati u konceptualnoj fazi razvoja tehničkih sustava često su originalnog dizajna, tj. mogu se temeljiti na implementaciji različitih tehnologija, zbog čega je usporedba kvalitete i učinkovitosti takvih koncepta zahtjevnija za vrednovatelja. Zbog toga što se usporedba na razini konceptijskog rješenja kod *FIM* metode temelji na usporedbi istih funkcija, kod koncepta originalnog dizajna usporedba i vrednovanje ne mogu efektivno ostvariti primjenom *FIM* metode.



**Slika 4.32.** Utjecaji na okoliš tri stolna sata budilice [330]

Rezultati usporedbe analiziranih koncepta stolnih satova-budilica *EcoIndicator 99* metodom [328] upućuju na veoma sličan ekološki profil razmatranih proizvoda (slika 4.32.). Procjena utjecaja digitalnog sata budilice upućuje na oko 10 % veću ekološku prihvatljivost tog koncepta u usporedbi s mehaničkim satom budilicom. Taj je rezultat u granicama pogreške procjene životnog ciklusa. Bernstein i drugi [50] navode da rezultati procjene životnog ciklusa u ovom slučaju nisu bili od koristi konstruktorima u svrhu rekonstrukcije i osmišljavanja novog koncepta koji bi bio ekološki prihvatljiviji od navedenih koncepta. Stoga su Bernstein i drugi [50] konstruktorima ponudili *FIM* metodu [52].

*FIM* metodom [52] utjecaji na okoliš dodijeljeni su pripadajućim funkcijama proizvoda (funkcijama proizvoda koje ih uzrokuju) što je konstruktorima omogućilo da bolje sagledaju ekološke profile triju analiziranih koncepta proizvoda. Na temelju ovih ekoloških profila konstruktori su proveli rekonstrukciju i predložili ekološki prihvatljiviji koncept [50]. Rezultati povezivanja funkcija proizvoda i pripadajućih utjecaja na okoliš *FIM* metodom

temelje se na prethodno upitnikom prikupljenih podataka. Povezivanje funkcija proizvoda i utjecaja proizvoda na okoliš *FIM* metodom [50] osniva se na subjektivnoj procjeni konstruktora ili ekodizajnerskih stručnjaka.

Prema rezultatima procjene utjecaja na okoliš Bernsteina i drugih [50], ekološki najprihvatljiviji koncept jest elektronički sat budilica (0,135 Pt), zatim mehaničko-digitalni sat budilica (0,145 Pt), a tek potom mehanički sat budilica (0,15 Pt). Ako iz procjene utjecaja na okoliš izuzmemo *kućište* i *konstrukciju proizvoda*, rezultat rangiranja prema ekološkoj prihvatljivosti jest mehanički sat budilica (0,05 Pt), mehaničko-digitalni sat budilica (0,095 Pt) te digitalni sat budilica (0,135 Pt). Bernstein i drugi [50] ovim izuzimanjem funkcija i rangiranjem pokazuju da postoji veliki potencijal za minimiziranje utjecaja na okoliš rekonstrukcijom proizvoda. Ujedno upozoravaju na poteškoće koje mogu nastati pri vrednovanju ekološke prihvatljivosti proizvoda isključivo na osnovi rezultata procjene životnog ciklusa. Naime, kad su konstruktori dobili na uvid samo rezultate procjene životnog ciklusa, nisu proizveli rješenja za rekonstrukciju ili osmislili novi koncept proizvoda.

Kao rezultat primjene *FIM* metode [52] u studiji slučaja Bernstein i drugih [50], konstruktori su implementirali strategiju rekonstrukcije sporednih funkcija proizvoda za koje su procijenjeni zamjetno veliki utjecaji na okoliš. Iako digitalni sat budilica ukupno ima manje utjecaje na okoliš nego mehanički sat budilica, utjecaji na okoliš dodijeljeni glavnim funkcijama nekoliko su puta veći kod digitalnog sata budilice nego kod mehaničkog sata budilice. Dakle, stupanj mogućeg smanjivanja utjecaja na okoliš rekonstrukcijom digitalnog sata budilice manji je nego je to slučaj s mehaničkim satom budilicom. To je stoga što su sporedne funkcije proizvoda potencijalni kandidati za rekonstrukciju [50].

U radu Bernstein i drugih [50] demonstrirana je efektivnost *FIM* metode za potporu aktivnostima rekonstrukcije proizvoda. Ti autori zaključuju da je *FIM* metoda namijenjena rekonstrukciji proizvoda, no ne i razvoju novih i inovativnih koncepata proizvoda. Glavni nedostaci spomenute metode jesu subjektivnost konstruktora pri povezivanju utjecaja na okoliš komponente i funkcije proizvoda te nesigurnost procjene životnog ciklusa proizvoda koja nastaje zbog nedostupnosti podataka o životnom ciklusu proizvoda, odabiru granice sustava i metode procjene utjecaja na okoliš [50].

Sporedne funkcije mehaničkog sata budilice glavna su izvorišta utjecaja na okoliš tog proizvoda. Sukladno tomu ukupni utjecaji na okoliš mehaničkog sata budilice umnogome ovise o njegovim sporednim funkcijama i preliminarnim rješenjima tih funkcija. Zbog tih

razloga konstruktori u studiji slučaja [50] strateški su odlučili odabrati mehanički sat budilicu kao proizvod na kojemu će izvesti rekonstrukciju radi smanjivanja utjecaja na okoliš.

Početni rezultati procjene utjecaja na okoliš metodom *EcoIndicator 99™* upućivali su na približno slične utjecaje na okoliš za sva tri koncepta stolnog sata budilice [50]. Analizirani proizvodi, odnosno koncepti, prilično se razlikuju u radnim principima, konstrukcijom i funkcijama [50]. Prema Bernsteinu i drugima [50], to je očekivano jer je razvoj takvih proizvoda vjerojatno bio vođen nastojanjem da se osmisle nova rješenja, a ne razvojem ekološki prihvatljivijih proizvoda.

Kod digitalnog i mehaničko-digitalnog sata budilice glavna funkcija ‘alarm aktivirati’ uzrokuje najviši udio svih utjecaja na okoliš. Kod mehaničkog sata budilice, utjecaji na okoliš koncentrirani su u nekoliko sporednih funkcija; kućištu i konstrukciji proizvoda, dok glavna funkcija ‘alarm aktivirati’ uzrokuje samo mali dio ukupnih utjecaja na okoliš [50].

Prelazak s mehaničkog na elektronički (digitalni) mehanizam donosi pogodnosti za korisnike (nema potrebe za ručnim navijanjem sata i lakše se očitava vrijeme), no noviji koncepti ne donose pogodnosti glede smanjenih utjecaja na okoliš. Najveći uzrok visokim utjecajima na okoliš digitalnog sata budilice jest u procesu proizvodnje tiskane pločice i elektroničkih komponenata [50].

### **4.8. Ograničenja predložene metode**

Vrednovanje ekološke prihvatljivosti koncepata proizvoda predloženom metodom tijekom razvojnog procesa zbog sljedećih njezinih ograničenja može biti zahtjevno za konstruktora ili tim konstruktora koji provodi vrednovanje.

Ograničenja predložene metode vrednovanja ekološke prihvatljivosti:

1. metoda zahtjeva prikupljanje podataka o konceptima koji se vrednuju, radnim principima, fizikalnim efektima i sekundarnim efektima na okoliš koncepata te analizu koncepata i njihovih radnih principa u prvom koraku primjene metode,
2. primjena metode može zahtijevati dodatnu poduku konstruktora o tome kako generirati lance fizikalnih efekata, kako identificirati fizikalne efekte i sekundarne efekte na okoliš te kako se koristiti katalogima fizikalnih efekata i principijelnih rješenja,

3. s obzirom na to da su koncepti koji se vrednuju na razini razrade koncepcijskoga rješenja, neke sekundarne efekte na okoliš nije moguće predvidjeti, a time niti vrednovati u konceptualnoj fazi razvoja tehničkih sustava,
4. postoji rizik od nekonzistentnog dodjeljivanja ocjena sekundarnim efektima na okoliš,
5. vrednovanje koncepata s velikim brojem transformacija i kompliciranim interakcijama fizikalnih efekata vremenski je zahtjevno,
6. metoda nije primjenjiva za kompleksne tehničke sustave jer generiranje lanaca fizikalnih efekata kod takvih sustava zahtjeva analizu fizikalnih efekata i sekundarnih efekata na okoliš koja može biti preopširna i resursno prezahtjevna za provedbu u konceptualnoj fazi razvoja tehničkih sustava.



## 5. VREDNOVANJE NA TEMELJU PROCJENE ŽIVOTNOG CIKLUSA

*U ovom su poglavlju opisani postupak, rezultati i ograničenja vrednovanja ekološke prihvatljivosti koncepata pranja rublja metodom procjene životnog ciklusa (LCA). Ulazni podatci LCA metode generiraju se na osnovi analize referentnih proizvoda i procjene životnog ciklusa koncepata. Podatci nužni za kvantifikaciju utjecaja na okoliš aproksimirani su na temelju analize već postojećih ili sličnih proizvoda i koncepata.*

---

### 5.1. Uloga procjene životnog ciklusa u provedenom istraživanju

Unatoč ograničenjima primjene LCA metode tijekom razvoja tehničkih sustava, vrednovanje ekološke prihvatljivosti proizvoda koje se temelji na rezultatima LCA-a jedini je znanstveno utemeljeni i objektivni način vrednovanja ekološke prihvatljivosti proizvoda te koncepata proizvoda. Vrednovanje ekološke prihvatljivosti tehničkih sustava u konceptualnoj fazi, u fazi konstrukcijske razrade i tijekom rekonstrukcije proizvoda provode se kombinirajući podatke o životnom ciklusu i utjecaju na okoliš referentnih proizvoda. Referentni proizvodi mogu biti već realizirani proizvodi poduzeća ili proizvodi konkurencije već prisutni na tržištu.

U svrhu validacije kriterija ekološke prihvatljivosti koncepata tehničkih sustava i predložene metode, potrebno je generirati dodatne podatke o ekološkoj prihvatljivosti koncepata pranja rublja jer su ovi koncepti identificirani kao ogledni primjer problema

vrednovanja ekološke prihvatljivosti koncepata u konceptualnoj fazi. Validacija kriterija ekološke prihvatljivosti i predložene metode podrazumijeva provjeru empirijske konzistentnosti i učinkovitosti razvijene potpore [77].

U istraživanju opisanom u ovoj disertaciji, provjera empirijske konzistentnosti i učinkovitosti temelji se na usporedbi rezultata vrednovanja ekološke prihvatljivosti koncepata kvalitativnim metodama s rezultatima vrednovanja ekološke prihvatljivosti koncepata kvantitativnim metodama. Nakon istraživanja u kojemu su ispitanici imali zadatak vrednovati ekološku prihvatljivost koncepata pranja rublja na kvalitativan način, ovo poglavlje donosi rezultate procjene utjecaja na okoliš istih koncepata primjenom metode procjene životnog ciklusa (*LCA*) koja je kvantitativna metoda vrednovanja ekološke prihvatljivosti proizvoda.

Smjernice *Eco-Design Value* [82] u kombinaciji s tehnikom vrednovanja pravilo većine [90] odabrane su za reprezentativni primjer vrednovanja kvalitativnim metodama u studiji vrednovanja ekološke prihvatljivosti koncepata pranja rublja. U literaturi su kvalitativne metode vrednovanja ekološke prihvatljivosti okarakterizirane subjektivnima. Služeći se metodama koje su kvalitativne, konstruktori moraju imati na umu da će njihove osobne preferencije, znanje i iskustvo imati veliki utjecaj na ishode vrednovanja i rangiranja razmatranih rješenja. S obzirom na to da su koncepti (a ne dokraja realizirani proizvodi) predmet vrednovanja ekološke prihvatljivosti u konceptualnoj fazi razvoja tehničkih sustava, postoji dodatna neizvjesnost glede predviđanja njihovih karakteristika i obilježja jednom kada budu realizirani kao gotovi proizvodi.

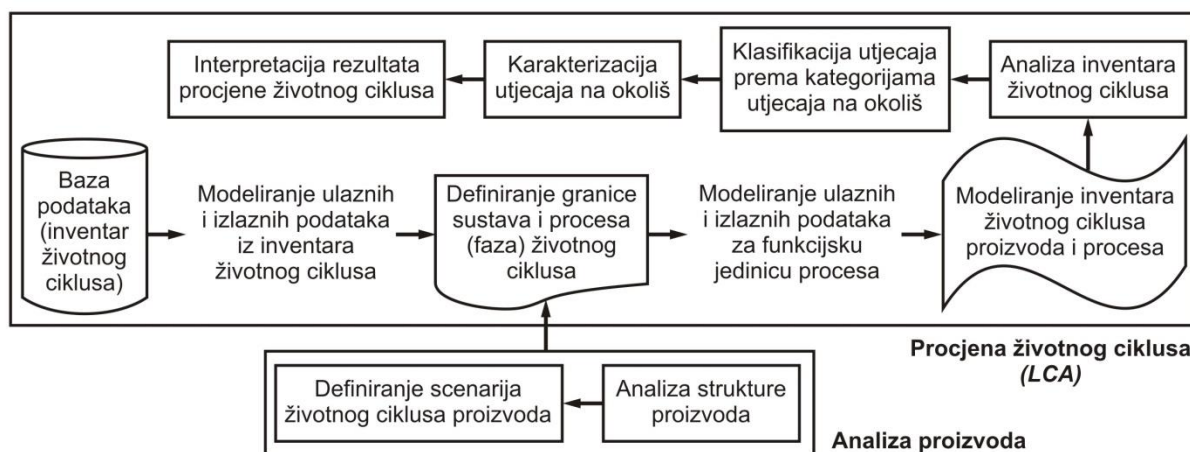
Metoda procjene životnog ciklusa (*LCA*) odabrana je kao ogledni primjer kvantitativnih metoda koje se primjenjuju u svrhu procjene utjecaja na okoliš. Spomenuta metoda primjenjuje se u procesu razvoja proizvoda kako bi se naknadno ustanovili utjecaji proizvoda na okoliš do kojih dolazi zbog procesa koji čine njegov ukupni životni ciklus. *LCA* se uobičajeno provodi retroaktivnom analizom prošlih projekata i procjenom utjecaja na okoliš proizvoda tijekom konstrukcijske razrade [267]. Primjeri u literaturi otkrivaju da je primjena *LCA* metode ostvariva i u konceptualnoj fazi, ali je potrebno pretpostaviti neke ključne karakteristike proizvoda (geometrijske značajke, materijale i tehnološke postupke u proizvodnji) te životni ciklus budućega proizvoda.

### 5.2. *LCA* metoda

Utjecaj na okoliš označuje svaku promjenu u okolišu, negativnu ili pozitivnu, nastalu potpuno ili djelomično kao rezultat aktivnosti neke organizacije (ISO EN ISO 14001) [133].

Potrošnja materijala i energije tijekom životnog ciklusa proizvoda potencijalno može prouzročiti utjecaje na okoliš, bilo u obliku onečišćenja okoliša, promjenom staništa biljnog i životinjskog svijeta okoliša ili drugim promjenama u okolišu. Stoga što služi kvantifikaciji utjecaja proizvoda i proizvodnih aktivnosti na okoliš [133], [229], [292], a zbog životnog ciklusa materijala, proizvoda ili procesa [36], [233], [331], metoda procjene životnog ciklusa (*LCA*) [1] prikladna je za primjenu u procesu konstruiranja i razvoja proizvoda [262].

S pomoću *LCA-a* moguće je prikazati procijenjeni utjecaj na okoliš proizvoda tijekom životnog ciklusa proizvoda, odnosno utjecaje na okoliš koji se pojavljuju zbog aktivnosti povezanih sa proizvodom i njegovom proizvodnjom [1], [34], [206]. Za potrebe procjene utjecaja na okoliš, životni ciklus proizvoda treba biti poznat, te podijeljen na faze kako bi utjecaji na okoliš mogli biti analizirani u svakoj fazi odvojeno [116], [332]. Zasebno se razmatraju ulazne sirovine i materijali, nabava i transport, proizvodnja, faza eksploatacije proizvoda te gospodarenje otpadom kada proizvodu prestane uporabna vrijednost [133].



**Slika 5.1.** Koraci analize proizvoda i procjene životnog ciklusa proizvoda (*LCA*) [100]

Dvije osnovne aktivnosti potrebne za procjenu utjecaja proizvoda na okoliš jesu analiza proizvoda i procjena životnog ciklusa ili *LCA* proizvoda (slika 5.1.). U skladu sa zaključcima donesenima nakon analize proizvoda i njegova budućega životnog ciklusa, ekološka prihvatljivost proizvoda vrednuje se uzimajući u obzir potrošnju energije i materijala, emisije i otpad te obilježja proizvoda poput rastavljivosti, ekološke prihvatljivosti tehnoloških postupaka proizvodnje i reciklabilnosti materijala. Proizvodu se pristupa tako da se tijekom vrednovanja ekološke prihvatljivosti proizvoda uzimaju u obzir sve faze njegova životnog vijeka, odnosno životni ciklus proizvoda u cijelosti.

Procjena životnog ciklusa može poslužiti za ekodizajn, optimiranje proizvoda i okolišnog utjecaja proizvođača ili poduzeća, postavljanja prioriteta primjene poboljšanja na proizvodu ili procesu, usporedbu proizvoda, marketing ili certificiranje proizvoda [147]. *LCA* metodologija nastala je u suradnji proizvodnih, vladinih i znanstvenih organizacija. Metodološki okvir i način provedbe metode propisani su standardom ISO 14040 [1].

**Tablica 5.1.** Metodološki koraci procjene životnog ciklusa (*LCA*) [1]

Koraci <i>LCA</i>	Opis
<b>1. Definiranje cilja i opsega studije</b>	Definiraju se ciljevi i svrha za koju će se rabiti rezultati procjene životnog ciklusa. Zatim se definiraju opseg studije te koje su faze životnog ciklusa uključene u studiju, a koje nisu (pretpostavke procjene životnog ciklusa). Potom se definira funkcionalna jedinica za usporedbu i kategorije utjecaja na okoliš koje će se iskoristiti za prikaz utjecaja na okoliš.
<b>2. Analiza inventara životnog ciklusa</b>	Razvoj inventara životnog ciklusa uključuje prikupljanje podataka o analiziranom proizvodu, procesima, definiranje ulaska i izlaska materijala i energije u pojedinim fazama životnog ciklusa (potrošnja resursa) i procjenu emisija, istjecanja i otpada u zrak, vodu i tlo. Rezultat analize inventara životnog ciklusa jest tablica inventara životnog ciklusa i utjecaja na okoliš. Razvoj inventara životnog ciklusa uključuje rad sa digitalnim bazama licenciranih podataka za sastavljanje inventara životnog ciklusa i otkrivanje utjecaja na okoliš na temelju podataka u inventaru.
<b>3. Procjena utjecaja na okoliš</b>	Procijenjena potrošnja razvrstava se između pojedinih materijala ili sirovina, te emisija primjereno uzroku djelovanja na okoliš. Utjecaji na okoliš kvantificiraju se provođenjem četiriju računarskih tehnika na inventaru podataka: klasifikacija utjecaja na okoliš u kategorije utjecaja na okoliš, karakterizacija, normalizacija i dodjeljivanje važnosti (težinskih faktora) kategorijama utjecaja na okoliš.
<b>4. Tumačenje (interpretacija) rezultata</b>	Rezultati se procjenjuju dovođenjem u odnos potrošnje resursa s obzirom na poznate svjetske rezerve za svakog stanovnika. Ovaj dio analize rezultata naziva se normalizacijom i oba se rezultata množe težinskim faktorima, čime se omogućuje vrednovanje rezultata. Rezultati se tumače s obzirom na pretpostavke, ciljeve i opseg studije definirane u ranijim koracima procjene životnog ciklusa.

Standardom ISO 14040 [1] propisuju se četiri metodološka koraka primjene metode procjene životnog ciklusa (tablica 5.1.). U prvom se koraku definiraju ciljevi i opseg studije, za što je nužno definirati tzv. funkcionalnu jedinicu (eng. *functional unit*). Funkcionalna jedinica je kvantificirani učinak razmatranog sustava ili proizvoda koji služi kao referentna jedinica pri analizi životnog ciklusa i procjeni utjecaja na okoliš [85]. Kako bi rezultati procjene životnog ciklusa bili usporedivi, potrebno je usporediti proizvode koji realiziraju istu funkciju. Definiranje jednakih funkcionalnih jedinica u prvom metodološkom koraku *LCA-a* preduvjet je za ostvarivanje usporedivosti rezultata procjene životnih ciklusa proizvoda, odnosno alternativa, koji se uspoređuju [229].

Pristup razmatranja životnog ciklusa proizvoda razlikuje se od tradicionalnog pristupa konceptualnoj fazi razvoja proizvoda jer u žarištu nisu isključivo faza eksploatacije proizvoda

i zadovoljenje zahtjeva korisnika, nego otkrivanje kritičnih parametara proizvoda i procesa u životnom ciklusu proizvoda koji rezultiraju neprimjerenim utjecajima na okoliš.

Izračunavanje utjecaja na okoliš i vrednovanje postupka u iterativnim koracima ponavljaju se dok nije postignuta zadovoljavajuća razina detaljnosti i pouzdanosti [333]. Proizvod koji je predmet analize obično je završio svoj životni vijek, a procjeni životnog ciklusa prethodi prikupljanje podataka o proizvodu, životnom ciklusu proizvoda, potrošnji energije i materijala, te emisijama i otpadu. Prikupljeni se podatci unose u tzv. inventar životnog ciklusa proizvoda (eng. *Life Cycle Inventory*). Inventar životnog ciklusa sastavlja se na temelju podataka o tehnološkim procesima koji se tiču proizvodnje i potrošnje sirovina, materijala i energije te emisijama i otpadu pohranjenih u licenciranim bazama podataka, a radi standardizacije metode. Primjer takve baze jest europska baza podataka *Ecoinvent*<sup>TM</sup> [88], [89] koja je iskorištena tijekom procjene životnog ciklusa koncepata pranja rublja.

Tijekom procesa konstruiranja naglasak je na definiranju karakteristika proizvoda koje imaju veliki utjecaj na funkcionalnost, izgled, kvalitetu i troškove poput značajki oblika, strukture i radnih principa proizvoda. Te značajke ne moraju biti ključne za kvantifikaciju utjecaja na okoliš. Značajke proizvoda koje su ključne za kvantifikaciju utjecaja na okoliš jesu masa [140] i volumen proizvoda [124], [206]. Iako ove značajke uobičajeno nisu dostupne u konceptualnoj fazi razvoja proizvoda, u praksi se njihove veličine procjenjuju na temelju usporedbe s prošlim projektima, konkurentskim proizvodima i drugim tržišnim pokazateljima.

Poboljšavanje i rekonstrukcija proizvoda na osnovi rezultata procjene životnog ciklusa nije jednostavan zadatak za konstruktore. Rezultati procjene korisni su za razmatranje alternativnih scenarija životnog ciklusa proizvoda te razmatranje izmjena procesa životnog ciklusa alternativnim procesima sa svrhom smanjivanja potrošnje energije i materijala u životnom ciklusu. Zatim je, da bi se usporedili utjecaji prije i nakon izmjena scenarija životnog ciklusa ili procesa, potrebno unijeti izmjene u inventaru životnog ciklusa. Time se omogućuje generiranje nove slike utjecaja na okoliš, a usporedbom rezultata varijanata alternativnih životnih ciklusa proizvoda moguće je dobiti uvid u posljedice pojedinih izmjena proizvoda na magnitude utjecaja na okoliš. Rezultate procjene životnog ciklusa proizvoda nije jednostavno vrednovati. Inkrementalne promjene u inventaru životnog ciklusa proizvoda mogu rezultirati znatnim promjenama ukupnih utjecaja na okoliš.

Zbog praktičnih razloga (brojnost podataka i kompleksnost metode), procjena životnog ciklusa izvodi se s pomoću specijalističkih računalnih alata. Posebne digitalne baze podataka

razvijene su za potrebe daljnje analize inventara životnog ciklusa. Inventari životnog ciklusa kompatibilni su s računalnom potporom u obliku alata za procjenu životnog ciklusa.

Računalom podržani alati (softveri) [334], kao što su *SimaPro*<sup>TM</sup> [87], uporabljaju se pri modeliranju životnog ciklusa proizvoda ili procesa, te za kvantificiranje utjecaja na okoliš. Utjecaji na okoliš grupirani su prema kategorijama utjecaja na okoliš, normalizirani u ekvivalentne jedinice utjecaja na okoliš (eng. *Ecopoints*, *Pt*) te se zbrajaju preko težinskih faktora. Težinski faktori kvantifikacija su razina opasnosti od utjecaja na okoliš i utjecaja na zdravlje ljudi. Definirani su posebnim metodama [335].

Metode procjene utjecaja na okoliš razlikuju se po načinu karakterizacije (broj i vrsta kategorija utjecaja na okoliš), po metodama normalizacije utjecaja na okoliš, po metodama za određivanje težinskih faktora te po načinu prikaza. Utjecaji na okoliš mogu biti prikazani u obliku srednjih ili krajnjih utjecaja na okoliš. U literaturi se mogu pronaći brojni pregledi i analize postojećih metoda procjene utjecaja na okoliš ([206], [229], [336], [337], [338]). Neke od najraširenijih metoda procjene utjecaja na okoliš jesu *CML2001*<sup>TM</sup> [268], *EDIP 2003*<sup>TM</sup> [339], *Ecoindicator 99*<sup>TM</sup> [328], *IMPACT 2002+*<sup>TM</sup> [340], *TRACI 2.0*<sup>TM</sup> [341], *USEtox*<sup>TM</sup> [342] i *ReCiPe*<sup>TM</sup> [86].

Utjecaji proizvoda na okoliš klasificiraju se i prikazuju s obzirom na kategorije utjecaja na okoliš.

- Klimatske promjene

U ovu kategoriju utjecaja na okoliš svrstavaju se kemijski spojevi koji lako apsorbiraju infracrveno zračenje. Takvi spojevi u atmosferi uzrokuju zadržavanje topline unutar Zemljine atmosfere, pridonose učinku zelenog staklenika te posljedično tomu, porastu prosječne temperature na Zemlji.

- Smanjivanje ozonskog omotača

Postoje kemijski spojevi koji se ponašaju kao katalizatori procesa smanjivanja ozonskog omotača u stratosferi. Smanjivanje ozonskog omotača utječe na porast opasnosti od potencijalno štetnih ultraljubičastih zraka koje dopiru do Zemljine površine.

- Kiselost okoliša

Određeni kemijski spojevi uzrokuju stvaranje kiselina ili pospješuju stvaranje takvih spojeva. Ovakvo obilježje kemijskih spojeva ocjenjuje se s obzirom na potencijal spoja za stvaranje slobodnih vodikovih iona i u usporedbi sa sumporovim dioksidom (SO<sub>2</sub>).

Povećani postotak takvih spojeva u okolišu uzrokuje porast kiselosti okoliša, pojavu kiselih kiša i time remećenje bioloških procesa.

- Fotooksidacija

Fotooksidansi su zagađivači koji nastaju zbog djelovanja Sunčevih zraka na ugljikovodike u okolišu. Riječ je o organskim kemijskim spojevima koji su u visokim koncentracijama u okolišu štetni. Proces fotooksidacije uzrokuje razgradnju polimera na mikrospojeve, čija prisutnost u atmosferi može uzrokovati remećenje prirodnih i bioloških procesa u okolišu.

- Deforestacija

Smanjeni udio šumskog pokrova može uzrokovati manjak hranjivih tvari u tlu ili vodi, kao što su nitrati, fosfor, ugljik ili kisik. Udio navedenih hranjivih tvari u kemijskome spoju upućuje na smanjivanje količine hranjivih tvari u okolišu i na potencijalni utjecaj na deforestaciju okoliša.

- Utjecaj toksičnih kemijskih spojeva na eko-sustav i zdravlje ljudi

Na toksičnost utječu kemijski spojevi koji uzrokuju porast smrtnosti (ljudi, biljnih ili životinjskih vrsta) zbog njihove izloženosti i prisutnosti u okolišu iznad određenoga neškodljivog udjela toksičnih kemijskih spojeva.

### **5.3. Primjena LCA metode na primjeru koncepata iz studije slučaja**

Zbog toga što je LCA metodom omogućena kvantifikacija utjecaja proizvoda na okoliš, čime se omogućuje objektivnost pri odlučivanju [343], riječ je o prikladnom i jedinoj pouzdanoj metodi koja omogućuje vrednovanje i usporedbu ekološke prihvatljivosti proizvoda [9], [36], [262], [331].

#### 5.3.1. Cilj i opseg procjene životnog ciklusa koncepata

U prvom koraku procjene životnog ciklusa definiraju se cilj i opseg procjene proizvoda ili konceptijskih rješenja proizvoda koji su predmet procjene utjecaja na okoliš, funkcionalna jedinica koja je temelj za usporedbu, faze životnog ciklusa koje su razmatrane u studiji, te razina detaljnosti proizvoda i životnog ciklusa proizvoda. Procjena životnog ciklusa provedena je radi vrednovanja ekološke prihvatljivosti pet konceptijskih rješenja:

1. koncept A – proces pranja praškastim deterdžentom za strojno pranje rublja i toplom vodom (60 – 95 °C),
2. koncept B – proces pranja pjenom deterdženta za strojno pranje rublja i toplom vodom (30 °C),
3. koncept C – proces ultrazvučnoga pranja tekućim deterdžentom za strojno pranje rublja i vodom,
4. koncept D – proces čišćenja suhim ledom (ugljkovim dioksidom),
5. koncept E – proces pranja polimernim kuglicama, praškastim deterdžentom za strojno pranje rublja i toplom vodom (30 °C).

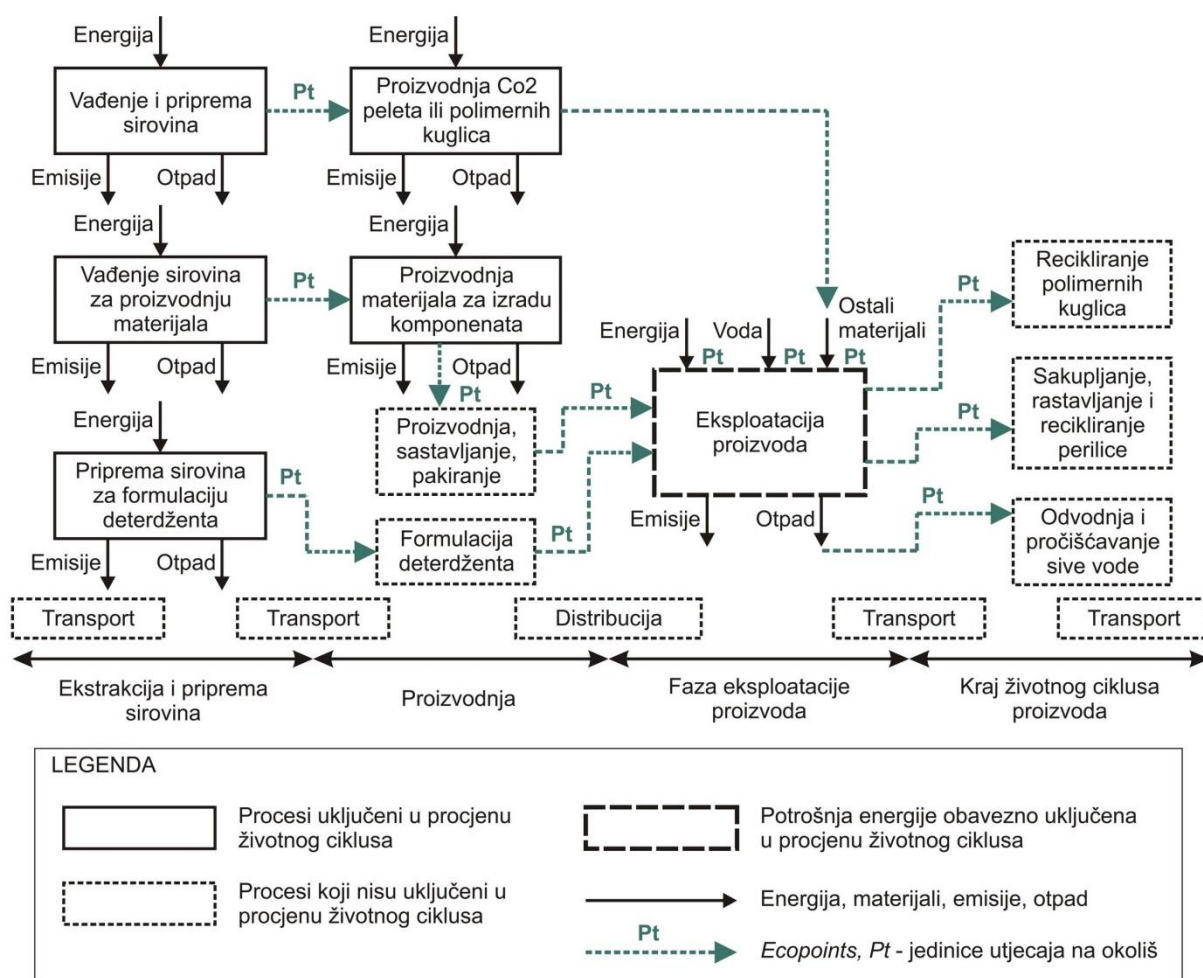
Korak u kojemu se definiraju cilj i opseg procjene životnog ciklusa služi kao vodič za dosljedno provođenje *LCA* analize, i to stoga što se metoda temelji na subjektivnim izborima procjenitelja.

Ukupni se životni vijek perilice rublja smanjuje sa 7 do 12 godina na 5 do 10 godina [344]. Prosječni broj ciklusa pranja rublja po kućanstvu (u zemljama Europske unije) iznosi 234 [345] ili 220 [346] ciklusa godišnje. Uzimajući u obzir preporuke Rüdenuera i drugih [279], prosječni je životni vijek perilice rublja za strojno pranje rublja u kućanstvima 10 godina te 200 ciklusa pranja godišnje (2 – 3 puta tjedno po kućanstvu [347]). Stoga je ukupni broj ciklusa pranja rublja tijekom životnog vijeka svih pet analiziranih konceptijskih rješenja procijenjen na 2000 ciklusa pranja. Funkcionalna jedinica iznosi 4,5 kilograma rublja uz dopušteno odstupanje u iznosu  $\pm 0,5$  kilograma rublja po ciklusu pranja.

Učinci na okolišu zbog neformalnog načina prikupljanja i transporta dotrajalih perilica imaju zanemariv udio na ukupne utjecaje na okoliš. Emisije koje mogu nastati zbog nestručnoga gospodarenja i prikupljanja perilica potpuno ovise o udjelu opasnih i toksičnih materijala proizvoda [348]. U ovoj studiji životnog ciklusa koncepata proizvoda, kojoj je svrha vrednovanje ekološke prihvatljivosti i usporedba utjecaja na okoliš konceptijskih rješenja, zanemareni su sljedeći procesi u životnom ciklusu: proizvodnja i potrošnja energije i materijala za ekstrakciju i vađenje sirovina za proizvodnju materijala od kojih su izrađene komponente proizvoda, potrošnja energije tijekom proizvodnje komponenata proizvoda, procesi prijevoza (transporta) sirovina, materijala, komponenata i distribucija proizvoda, proizvodnja i potrošnja materijala i energije za pakiranje proizvoda, proizvodnja i potrošnja materijala i energije tijekom procesa održavanja i popravaka proizvoda tijekom faze



eksploatacije te potrošnja energije i materijala tijekom faze kraja životnog vijeka proizvoda (potencijalno recikliranje, rekonstrukcija, ponovna proizvodnja ili oporaba proizvoda).



**Slika 5.2.** Prikaz procesa i faza životnog ciklusa koji su uključeni u studiju životnog ciklusa konceptijskih rješenja A, B, C, D i E (ilustracija prema [349])

Na temelju analize utjecaja na okoliš i troškova zbog neformalnog načina prikupljanja perilica rublja (za strojno pranje rublja u kućanstvima) nakon završetka njihova životnog vijeka, Pertl i drugi [348] zaključili su da se recikliranjem komponenata proizvoda nakon završetka faze eksploatacije mogu postići brojne pogodnosti glede smanjivanja utjecaja na okoliš proizvoda. Svrha je identificirati komponente proizvoda sa visokim stupnjem reciklabilnosti i komponente proizvoda koji su najbolji kandidati za rekonstrukciju, a na temelju liste materijala proizvoda. Slika 5.2. prikazuje granice sustava i procese koji su uključeni u analizu i procjenu životnih ciklusa konceptijskih rješenja pranja rublja. Utjecaji na okoliš koji su uzrokovani procesima u fazama životnog ciklusa proizvoda koje nastupaju nakon faze eksploatacije proizvoda nisu uzeti u obzir u ovoj LCA studiji zbog zanemarivog

udjela tih utjecaja u ukupnim utjecajima na okoliš proizvoda tijekom cijeloga životnog vijeka proizvoda.

### 5.3.2. LCA koncepta pranja rublja A

U nastavku je analiziran problem odstranjivanja nečistoća sa tekstila na primjeru automatske perilice rublja za strojno pranje rublja u kućanstvima. Koncept pranja rublja A koncept je pranja praškastim deterdžentom za strojno pranje rublja i toplom vodom (60/90 °C).

Na učinkovitost procesa pranja utječu: vrsta, masa i sastav tekstila, vrsta i količina nečistoća, kvaliteta vode (teški metali u vodi, tvrdoća vode, ...), parametri procesa pranja (vrsta mehaničkoga djelovanja na tekstil, temperatura pranja i vrijeme pranja) i sastav deterdženta [345].

Razmatrani koncepti pranja rublja razlikuju se po vrsti fizikalnih efekata i radnim principima kojima se ostvaruje pranje, odnosno čišćenje tekstila. Nečistoće i prljavština vežu se za tekstilnu odjeću sljedećim mehanizmima [283]:

- čestice u šupljinama između tekstilnih vlakana, pređe i konca
- čestice između šavova i u pukotinama tekstila
- zbog van der Waalsovih i Coulombovih sila
- stvaranjem kemijskih veza na površini vlakna (npr. posredovanjem kalcija iz vode).

Većina se nečistoća odstranjuje s vlakana fizičkim putem zbog djelovanja deterdženta. U tom procesu važnu ulogu imaju sile koje djeluju na vlakna, adsorpcija površinski aktivnih tvari (u sastavu deterdženta) zbog čega pucaju slabije veze između nečistoća i vlakana i stabilizatora u sastavu deterdženta. Otklanjanje nečistoća može se ostvariti i kemijskim djelovanjem na vlakna, bjelilima i enzimima u sastavu deterdženta. U sastavu praškastih deterdženata za strojno pranje rublja u kućanstvima na europskom se tržištu nalaze:

- površinski aktivne tvari (npr. linearni alkil-benzen sulfonat – *LAS*, sapun [350])
- omekšivači vode i punila (npr. zeolit [350], praškasti natrijev silikat, silikat u slojevima, natrijev trifosfat (*STPP*) [351])
- izbjeljivači (npr. natrijev hipoklorit, monohidrat i tetrahidrat natrijev perborat, natrijev perkarbonat, hidrogen-peroksid [351])

- dodatci deterdžentu (npr. poliakrilat, natrijev sulfat, polietilen glikol, silikon [350]).

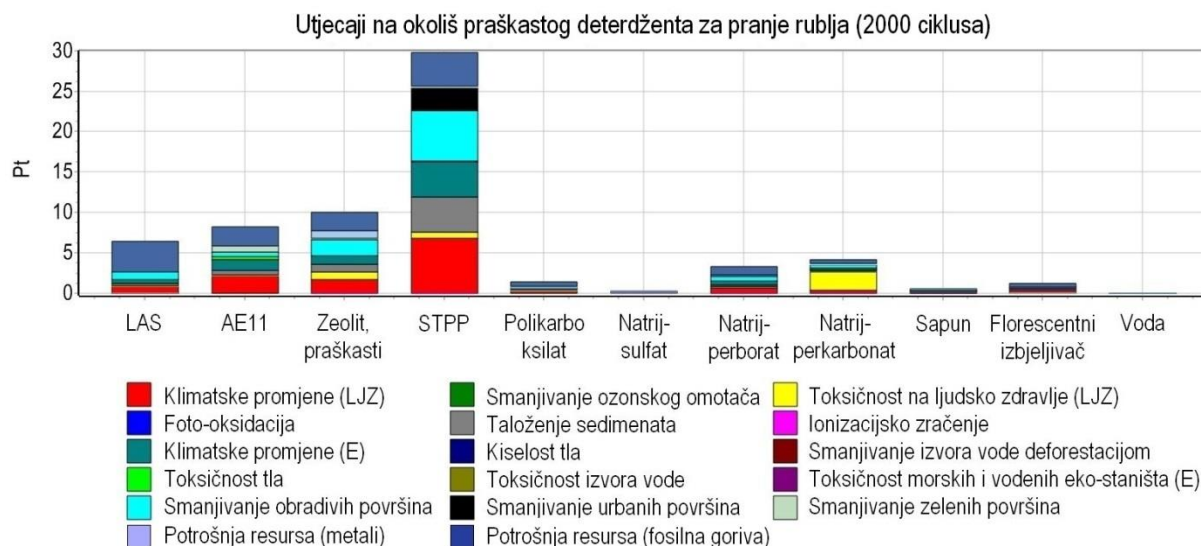
Tablica 5.2. prikazuje sastav praškastog deterdženta za strojno pranje rublja kod koncepta A, B i E. EN60456:2010 standardom propisana je norma za doziranje deterdženta koja iznosi 40 grama te još 12 grama po svakom kilogramu tekstila [352].

**Tablica 5.2.** Sastav praškastog deterdženta za strojno pranje rublja

Sastojci u sastavu deterdženta [353]	Maseni udio sastojaka prema [353]	Maseni udio sastojaka (LCA studija)
<b>linearni alkil-benzen sulfonat (LAS)</b>	10 – 25 %	15 %
<b>etoksilirani alkohol (AE11)</b>		10 %
<b>zeolit, praškasti</b>	30 – 55 %	10 %
<b>natrijev trifosfat (STPP)</b>		30 %
<b>polikarboksilat, 40 % površinski aktivne tvari</b>	3 – 8 %	5 %
<b>natrijev sulfat</b>	0 – 30 %	14 %
<b>natrijev perborat, monohidrat, praškasti</b>	8 – 15 %	5 %
<b>natrijev perkarbonat, praškasti</b>		5 %
<b>sapun</b>	0,1 – 4 %	0,5 %
<b>fluorescentni izbjeljivač (DASI)</b>	0,2 – 2 %	0,5 %
<b>voda</b>	5 – 15 %	5 %

Slika 5.3. prikazuje rezultate procjene utjecaja na okoliš koji su uzrokovani životnim ciklusom praškastog deterdženta za strojno pranje rublja. Najveći utjecaji na okoliš praškastog deterdženta za strojno pranje rublja nastaju zbog natrijeva trifosfata u sastavu deterdženta.

Najveći udio potrošnje energije u životnom ciklusu perilice za strojno pranje rublja jest u fazi eksploatacije (~80 %). Udio potrošnje energije u fazi ekstrakcije i nabave sirovina (kemijskih tvari u sastavu deterdženta) te u fazi proizvodnje praškastog deterdženta mnogo je manji od potrošnje energije u fazi eksploatacije perilice rublja i iznosi oko 16% ukupne potrošnje energije u životnom ciklusu perilice rublja. Potrošnja energije za formulaciju deterdženta iznosi oko 1,4 % ukupne potrošnje energije u životnom ciklusu perilice rublja. Proces potrošnje energije za odvodnju sive vode i potrošnja energije za pakiranje proizvoda iznose oko 1,5 % ukupne potrošnje energije u životnom ciklusu perilice rublja, te samo mali dio ukupne potrošnje energije (~ 0,4 %) u životnom ciklusu deterdženta za strojno pranje rublja [350].



**Slika 5.3.** Utjecaji na okoliš deterdženta za strojno pranje rublja

Stamminger i drugi [354] navode da za jedan ciklus pranja 4 kilograma rublja u automatskoj perilici rublja proizvedenoj 2004. godine potrošnja vode iznosi 49 litara, a potrošnja deterdženta 118 grama. Ovi su podatci istovjetni podacima o potrošnji električne energije i vode kod [348] (tablica 5.3.).

**Tablica 5.3.** Potrošnja električne energije i vode koncepta A [348]

	Potrošnja električne energije (kWh/ciklus)	Potrošnja vode (m <sup>3</sup> /ciklus)
Perilica rublja u prosjeku (godina proizvodnje 2000.)	1,5	0,1
Perilica rublja u prosjeku (godina proizvodnje 2010.)	0,85	0,04
Troškovi	0,17 EUR/kWh	3,5 EUR/m <sup>3</sup>

Potrošnja vode za proces pranja rublja koncepta A iznosi 35 litara po ciklusu. U prvom se dijelu ciklusa pranja 11 litara vode zagrijava, a potom su potrebna još 3 ispiranja rublja (8 litara po svakom ispiranju) [279]. Iz rada Rüdenuera i drugih [279] preuzeta je potrošnja energije po ciklusu za pranje na temperaturama od 30, 60 i 95 °C (tablica 5.4.). Tijekom procjene pretpostavljena je potrošnja deterdženta za pranje rublja u kućanstvima po ciklusu od 4 do 5 kilograma rublja u iznosu od 110 grama.

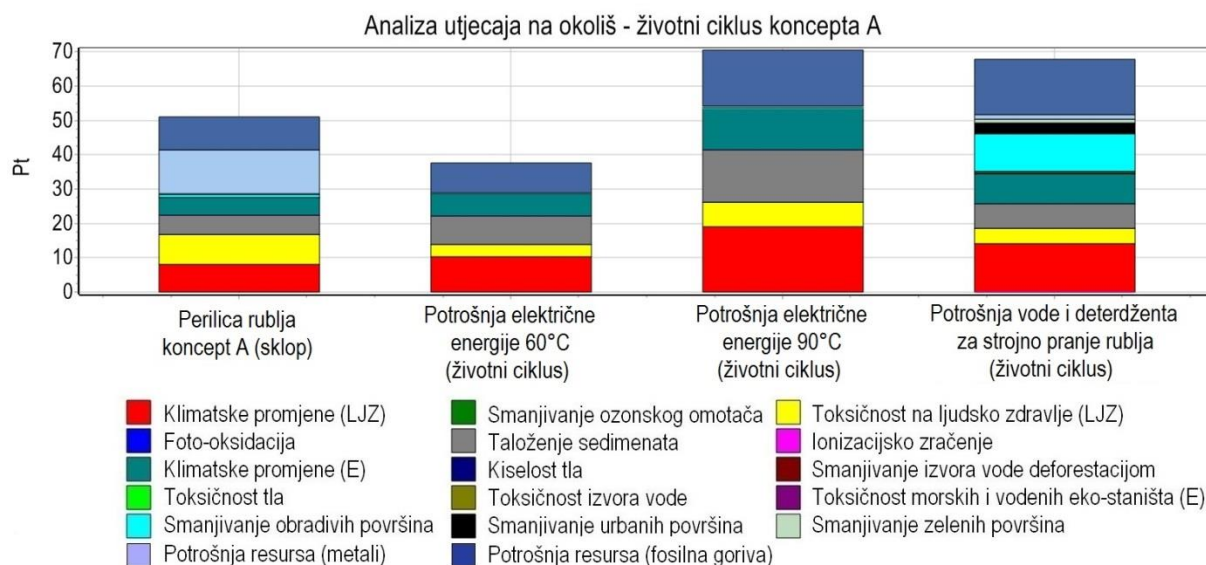
**Tablica 5.4.** *Potrošnja električne energije i vode za 1 ciklus strojnog pranja 5 kilograma rublja u perilici rublja [279]*

	<b>Potrošnja električne energije (kWh/ciklus pranja)</b>				
<b>Temperatura pranja</b>	20 °C	30 °C	40 °C	60 °C	95 °C
<b>Potrošnja električne energije za zagrijavanje vode za pranje</b>	0,06	0,1	0,28	0,64	1,15
<b>Potrošnja električne energije zbog mehaničkog djelovanja na rublje</b>	0,19				
<b>Ukupna minimalna potrošnja električne energije</b>	0,25	0,29	0,47	0,83	1,34
<b>Potrošnja električne energije perilice rublja A klase (godina proizvodnje 2004.)</b>	nema podataka	0,32	0,52	0,95	1,54
<b>Potrošnja električne energije, perilica rublja u prosjeku (godina proizvodnje 2004.)</b>	nema podataka	0,33	0,54	0,98	1,59
	<b>Potrošnja vode (m<sup>3</sup>/ciklus pranja)</b>				
<b>Potrošnja zagrijane vode, perilica rublja A klase (godina proizvodnje 2004.)</b>	0,011				
<b>Potrošnja vode po ciklusu ispiranja, perilica rublja A klase (godina proizvodnje 2004.)</b>	0,008				
<b>Ukupna potrošnja vode, perilica rublja A klase (godina proizvodnje 2004.)</b>	0,035				

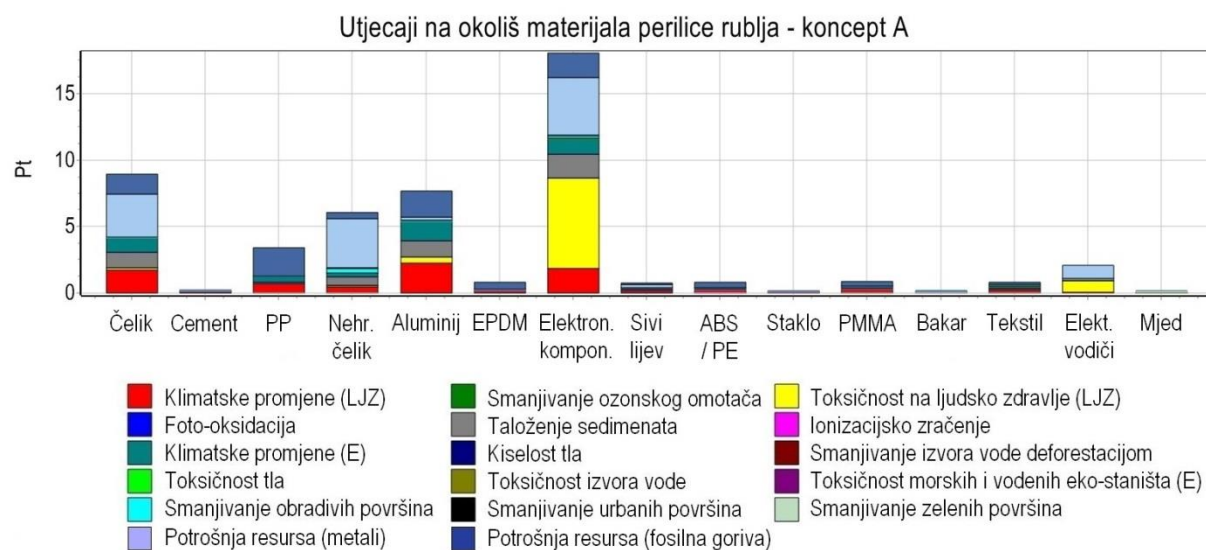
Otpriblike 20 % potrošnje električne energije u programu pranja rublja na 60 °C jest potrošnja električne energije zbog mehaničkoga djelovanja na rublje i pumpanja, a iznosi 0,19 kWh [279]. Takahashi i drugi [149] nalaze da je potrošnja električne energije kod modela perilice iz 2004. godine 66 % manja u usporedbi sa modelom iz 1991. godine. Rüdener i drugi [279] smatraju da se potrošnja električne energije zbog mehaničkog djelovanja na rublje i pumpanja vode tijekom procesa pranja u perilici rublja A energetske klase u budućnosti neće mijenjati ili poboljšavati.

Na slici 5.4. prikazani su utjecaji na okoliš zbog životnog ciklusa koncepta pranja rublja A. Pri potrošnji električne energije pretpostavljeno je da se 50 % ciklusa pranja obavlja u programu pranja na 60 °C, a preostalih 50 % ciklusa pranja na programu pranja s temperaturom pranja od 95 °C. U procjenu je uključena i faza dobave sirovina i proizvodnje materijala za izradu perilice rublja.

Najveći utjecaji na okoliš perilice koncepta pranja rublja A uzrokovani su potrošnjom električne energije, zatim potrošnjom praškastog deterdženta za strojno pranje rublja, tek potom materijalima od kojih je perilica proizvedena (slika 5.4.).



**Slika 5.4.** Analiza utjecaja na okoliš, kategorije srednjih utjecaja, životni ciklus koncepta pranja rublja A



**Slika 5.5.** Utjecaji na okoliš materijala perilice rublja koncepta pranja rublja A

U slučaju koncepta perilice rublja A iskorišteni su podatci o listi materijala perilice iz rada Rüdenuera i drugih [279]. Riječ je o perlici rublja proizvedenoj 2004. godine i ukupne mase 76 kilograma. Najveći utjecaji na okoliš koje uzrokuju materijali za izradu perilice koncepta A nastaju zbog materijala potrebnih za izradu elektroničkih komponenata, čelika i aluminija (slika 5.5.). Tablica 5.5. prikazuje materijale od kojih je izrađena perilica koncepta A.

**Tablica 5.5.** Lista materijala automatske perilice rublja za kućanstva: a) Machine II.2, godina proizvodnje: 2004. [279]; b) Novomatic, godina proizvodnje: 2005. [355]; c) Adora, godina proizvodnje: 2011. [355]; d) Eco Bubble™ [345]

Br.	Materijal	Masa (kg) MACHINE II.2 [279]	Masa (kg) NOVOMATIC 2005 [355]	Masa (kg) ADORA 2011 [355]	Masa (kg) Eco Bubble™ [345]
1.	čelik	20,6	25,54	25,11 (-1,68 %)	20,25
2.	beton	18,68	18,51	-	0
3.	polipropilen (PP)	12,67	16,34	16,83 (+3 %)	13,05
4.	nehrđajući čelik	5,87	5,84	5,69	5,7
5.	aluminij	4,13	1,28	1,33 (+4 %)	6,28
6.	etilen-propilen (EPDM) ili etilen-vinil-acetat kopolimer	2,95	1,790	1,94 (+8,38 %)	3,2
7.	elektroničke komponente	2,89	0,11	0,047 (+427 %)	5,19
8.	sivi lijev	1,92	-	9,28 (+483 %)	9,27
9.	akril-butadien-stirol (ABS) / polietilen (PE)	1,87	0,4	0,56 (+40 %)	2,62
10.	staklo	1,69	1,84	2,39 (+29,89 %)	2,19
11.	poli-metil-metakrilat (PMMA)	1,15	-	-	1,15
12.	bakar	0,75	1,25	1,68 (+34,4 %)	1
13.	tekstil (pamuk) – kompozit	0,38	0,34	0,53 (+55,88 %)	0,59
14.	elektronički vodiči	0,31	-	-	0,31
15.	mjed	0,02	-	-	0,02
16.	alumijska legura (Al + Zn + Cu)	-	-	1,99	-
17.	MDF (medijapan)	-	2,16	2,31	-
18.	LCD staklo	-	-	0,02	0,02
<b>Ukupno</b>		75,88	75,4	70,13	65,14
<b>Ostali materijali (nisu uključeni u procjenu)</b>		1,188	-	-	-

### 5.3.3. LCA koncepta pranja rublja B

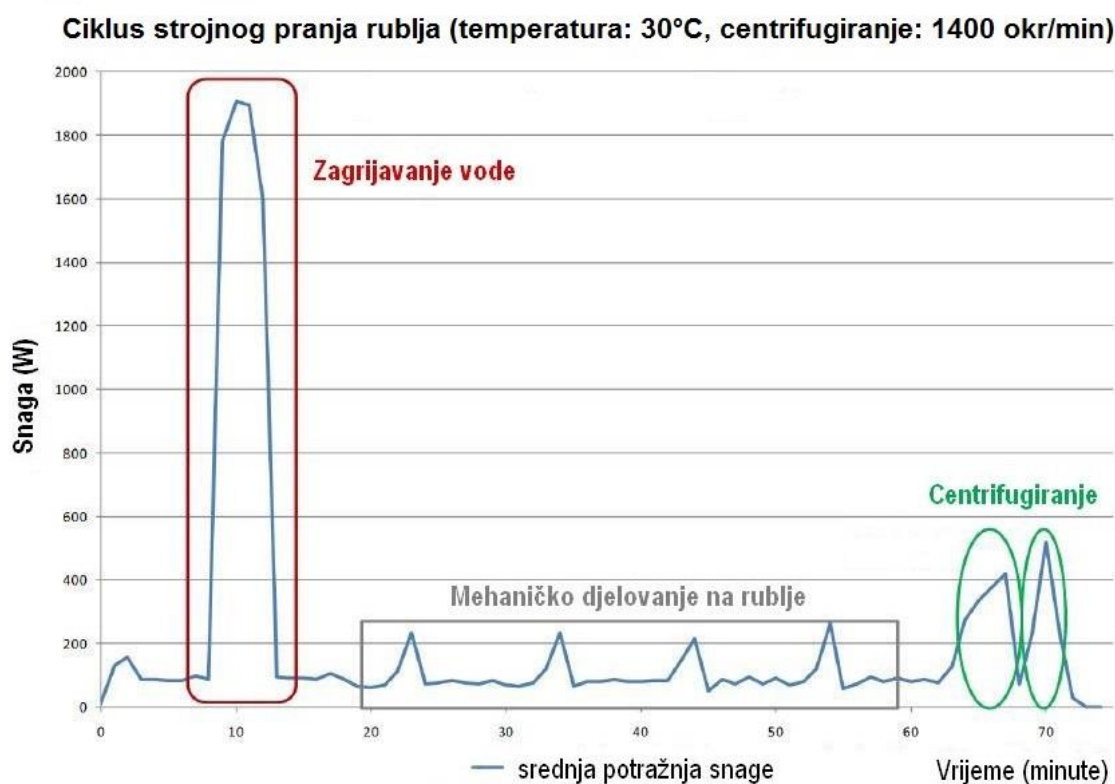
U konceptu pranja rublja B rublje se pere pjenom deterdženta za strojno pranje rublja i toplom vodom (30°C). Koncept je implementiran u Samsungovoj perilici za strojno pranje rublja u kućanstvima koja je komercijalno dostupna na europskom tržištu.

Tehnologija *Eco Bubble*™ podrazumijeva miješanje praškastog deterdženta sa vodom prije početka ciklusa pranja, pri čemu se posredovanjem zraka stvaraju mjehurići i pjena



praškastog deterdženta i vode [284]. Pjena brže prodire u prostor između tekstilnih vlakana od praškastog deterdženta čime se ostvaruje jednaka učinkovitost pranja na nižim temperaturama te štedi električna energija [284].

Potrošnja električne energije zbog zagrijavanja vode na 30 °C jest 0,33 kWh za jedan ciklus pranja (tablica 5.4.). Isto tako, potrošnja električne energije jednaka je 0,3 kWh prema radu Gallego-Juárez i drugih [285], kod kojih je učinkovitost u vezi s potrošnjom energije koncepta C usporediva s ciklusom pranja deterdžentom i toplom vodom (30 °C), odnosno potrošnjom energije koncepta B. Slika 5.6 prikazuje potrošnju električne energije standardnog ciklusa strojnoga pranja rublja toplom vodom (30 °C).



**Slika 5.6.** Dijagram potraživanja snage električne energije po ciklusu pranja deterdžentom i toplom vodom (30 °C) [356]

Potrošnja vode (u najboljem slučaju perilice proizvedene 2010. g.) [279] procijenjena je na 35 litara u slučaju koncepta A pranje deterdžentom i toplom vodom (60 °C). Testiranje potrošnje energije i vode jednoga većeg modela (Samsungova *Eco Bubble*<sup>TM</sup> perilica rublja WF80F5E5U4W kapaciteta 8 kilograma), pokazuje dobar omjer potrošnje električne energije (0,19 kWh) i vode (45 litara) pri programu hladnog pranja (15 °C) uz djelomično napunjenu perilicu (oko 3 kilograma rublja u perilici kapaciteta 8 kilograma). Nema dodatnih podataka o



doziranju deterdženta te je stoga pretpostavljena jednaka potrošnja deterdženta po ciklusu pranja kao kod koncepta A (110 grama po ciklusu pranja).

Lista materijala perilice rublja koncepta B procijenjena je na temelju podataka o listi materijala za perilicu rublja *Novomatic* proizvedene 2005. godine i perilicu rublja *Adora* proizvedene 2011. godine. Perilica rublja iz rada Rüdenuera i drugih [279] konstrukcijom je slična perilici rublja *Novomatic* [355] te je stoga lista materijala za perilicu rublja koncepta B sastavljena na osnovi liste materijala za perilicu spomenutu u radu Rüdenuera i drugih [279] te na temelju lista materijala za perilicu *Novomatic* iz 2005. godine i perilicu *Adora* novijega datuma proizvodnje [355]. Perilica rublja koncepta B, prema podacima proizvođača, ima masu 56 kilograma [345].

Ukupna masa Samsungove perilice *Eco Bubble™* jest 56 kilograma (tablica 5.6.). Za potrebe LCA koncepta pranja rublja B, masa perilice koncepta B procijenjena je na oko 66 kilograma, što je u granicama dopuštene nesigurnosti procjene životnog ciklusa koncepta.

**Tablica 5.6.** Obilježja i performanse perilice rublja s *Eco Bubble™* tehnologijom kapaciteta 6 kg (model WFF400E, Samsung) [345]

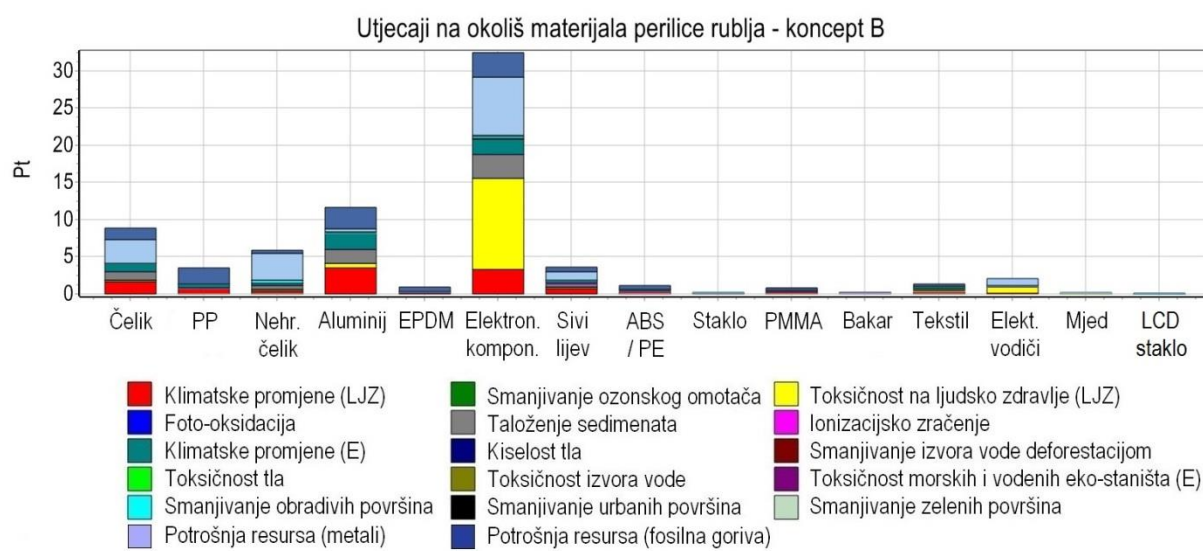
Značajke, tehničke specifikacije i pokazatelji radnog učinka	
kapacitet pranja	6 kg
maksimalna brzina centrifugiranja	1200 okr./min
standardno trajanje ciklusa	135 min
godišnja potrošnja energije (220 ciklusa) Wh/god.	170 kWh
godišnja potrošnja vode (220 ciklusa) l/god.	8580 l (~ 39 l po ciklusu pranja)
razina buke, pranje (dB)	61 dB
razina buke, centrifugiranje (dB)	76 dB
izbor temperature	Hladno (15° C), 20 °C, 30 °C, 40 °C, 60 °C, 95 °C
izbor brzine centrifugiranja	0, 400, 800, 1000, 1200
masa perilice rublja	56 kg

Tablica 5.5. prikazuje listu materijala za perilicu *Eco Bubble™* po uzoru na razlike u konstrukciji perilica *Adora* i *Novomatic* [355]. Masa i lista materijala za perilicu koncepta B procijenjene su na temelju podataka o konstrukciji i materijalima perilice proizvedene 2004. godine koja je poslužila i za procjenu perilice koncepta pranja rublja A (iz rada Rüdenuera i drugih [279]).

Masa betona u starijoj perilici *Novomatic* iz 2005. g. bila je oko 18,5 kilograma, dok je kod novije perilice rublja *Adora* (godina proizvodnje je 2011.) cement zamijenjen sivim

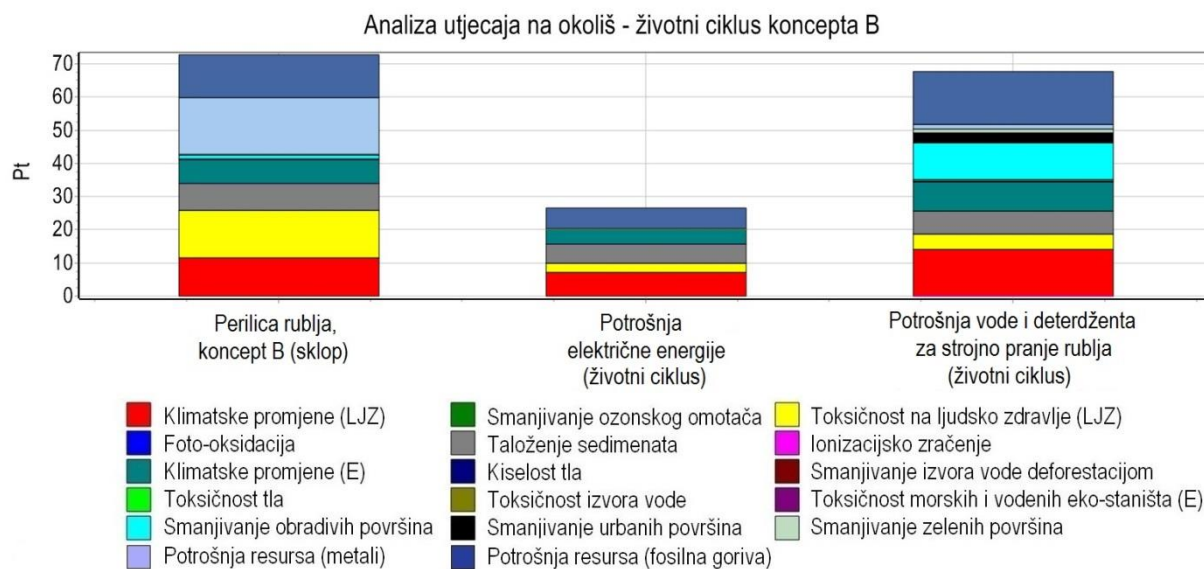
lijevom (ukupno 9,28 kilograma) [355]. Masa čelika i aluminija te polimera (polipropilen, polietilen) gotovo je istovjetna u perilicama *Adora* i *Novomatic*. Mase stakla, bronce, MDF-a i EPDM-a nešto su više kod novije perilice *Adora*.

Masa je integriranih elektroničkih sklopova i elektroničkih komponenata do 4 puta veća nego u starijem modelu perilice, što se može objasniti većim brojem funkcija novije perilice [355]. U listi materijala napravljena je korekcija u količini materijala integriranih elektroničkih sklopova. Integrirani elektronički sklopovi najviše pridonose utjecajima na okoliš (slika 5.7.) te je stoga napravljena iznimka za potrebe usporedbe s konceptom A. Radi lakše procjene utjecaja na okoliš masa integriranih elektroničkih sklopova jednaka je kao u slučaju perilice koncepta A.

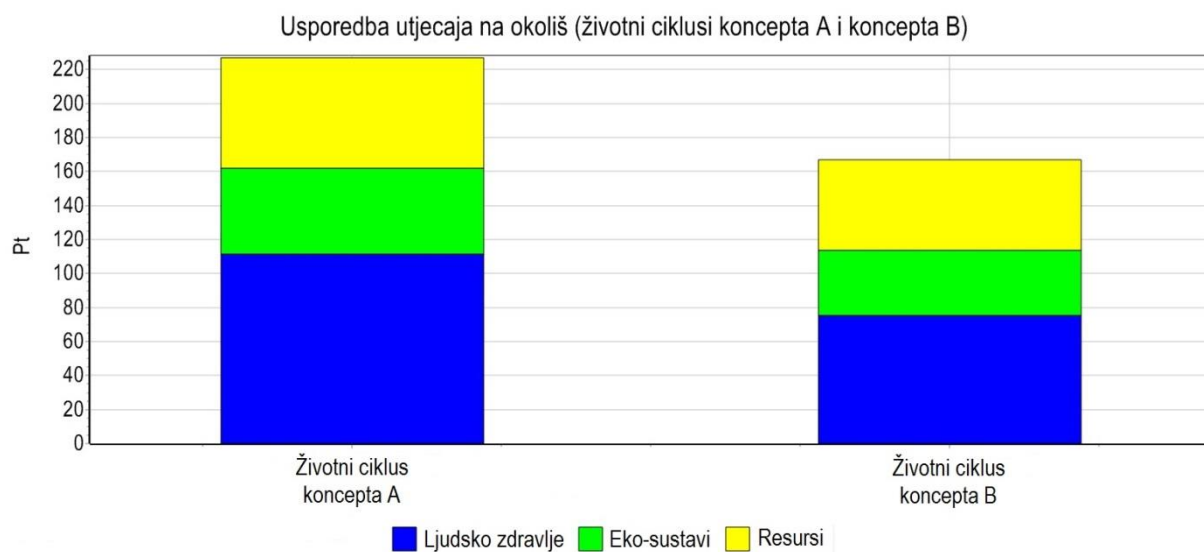


**Slika 5.7.** Kategorije srednjih utjecaja na okoliš materijala perilice rublja (koncept B)

Slika 5.8. prikazuje utjecaje na okoliš koncepta pranja rublja B. Utjecaji na okoliš koncepta pranja rublja B manji su od utjecaja na okoliš koncepta pranja rublja A zbog manjih utjecaja uzrokovanih potrošnjom energije u životnom ciklusu proizvoda i potrošnje deterdženta za strojno pranje rublja (slika 5.9.).



**Slika 5.8.** Analiza utjecaja na okoliš koncepta B (životni ciklus, kategorije srednjih utjecaja)

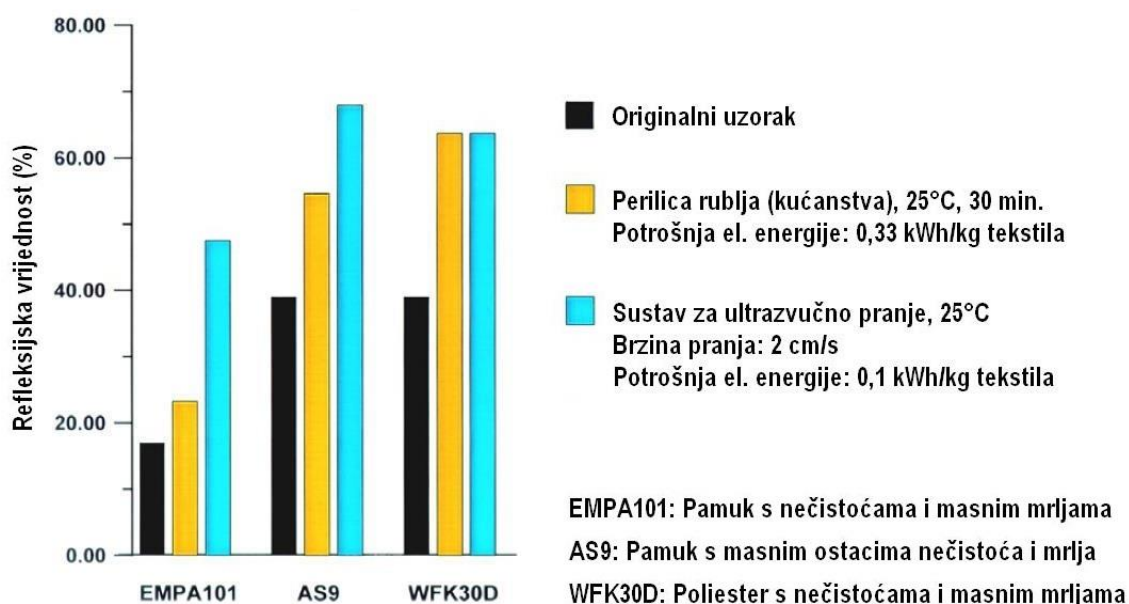


**Slika 5.9.** Usporedba utjecaja na okoliš životnih ciklusa koncepta A i B

### 5.3.4. LCA koncepta pranja rublja C

Koncept pranja rublja C proces je ultrazvučnoga pranja tekućim deterdžentom za strojno pranje rublja i vodom. Podatci za procjenu životnog ciklusa dostupni su u radu Gallego-Juárez i drugih [323]. U studiji su opisani parametri i ishodi testiranja prototipa i procesa ultrazvučnoga pranja za primjenu u tekstilnoj industriji. U nedostatku preciznijeg podatka o potrošnji vode potrebne za ultrazvučno pranje 4 do 5 kilograma rublja, iz rada

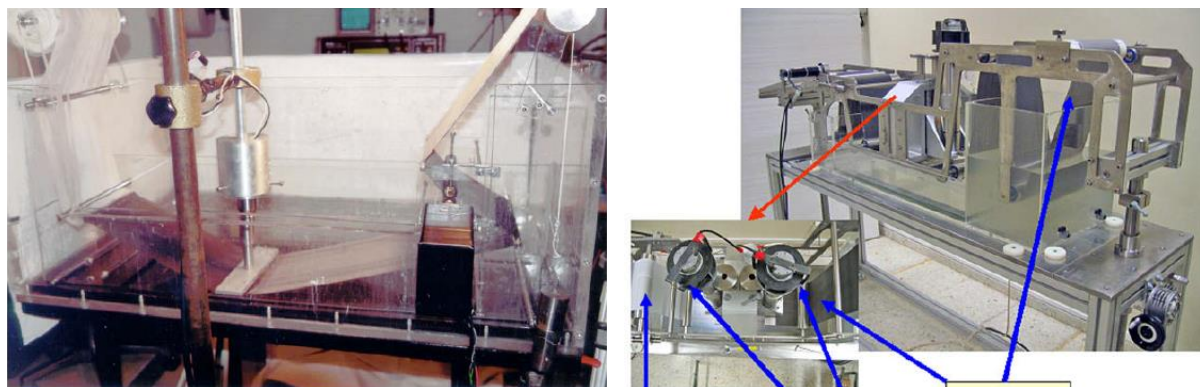
Voutersa i drugih [357] preuzet je podatak da je za odmašćivanje 1 kilograma tekstila potrebno između 5 i 10 litara vode.



**Slika 5.10.** Usporedba refleksijskih vrijednosti pranja deterdžentom i toplom vodom (25 °C) i ultrazvučnog pranja [323]

Procjena potrošnje energije u eksploataciji temeljena je na podatku Gallego-Juárez i drugih [323] o prosječnoj potrošnji električne energije po kilogramu tekstila koja iznosi 0,1 kWh (slika 5.10.). Ukupno vrijeme ultrazvučnoga pranja 4,5 kilograma tekstila izračunano je na temelju podatka o brzini ultrazvučnoga pranja koje je jednako brzini vođenja tekstilne tkanine (prema [323]) te izračunanoj ukupnoj površini tkanine mase 4,5 kilograma. Prema podacima o testiranju prototipa Gallego-Juárez i drugih [323] brzina pranja ultrazvukom iznosi 0,02 m/s. Ukupno vrijeme pranja ultrazvukom 4,5 kilograma tekstila prototipnim primjerom procesa opisanom u radu Gallego-Juárez i drugih [323] iznosi oko 30 minuta. Na osnovi tog podatka potrošnja električne energije za ultrazvučno pranje 4,5 kilograma tekstila iznosi otprilike 0,05 kW.

Za koncept pranja rublja C osmišljeno je rješenje kod kojeg su dva pretvarača ultrazvuka montirana paralelno jedan uz drugi (slika 5.11.). Time je, za razliku od prototipnog rješenja Gallego-Juárez i drugih [323], omogućeno ultrazvučno odstranjivanje nečistoća po cijeloj površini rublja (obzirom na to da je prosječna širina odjeće otprilike dvaput veća nego širina oprane tkanine u procesu Gallego-Juárez i drugih [323]).



*Slika 5.11. Koncept C – prototip ultrazvučne perilice rublja [323]*

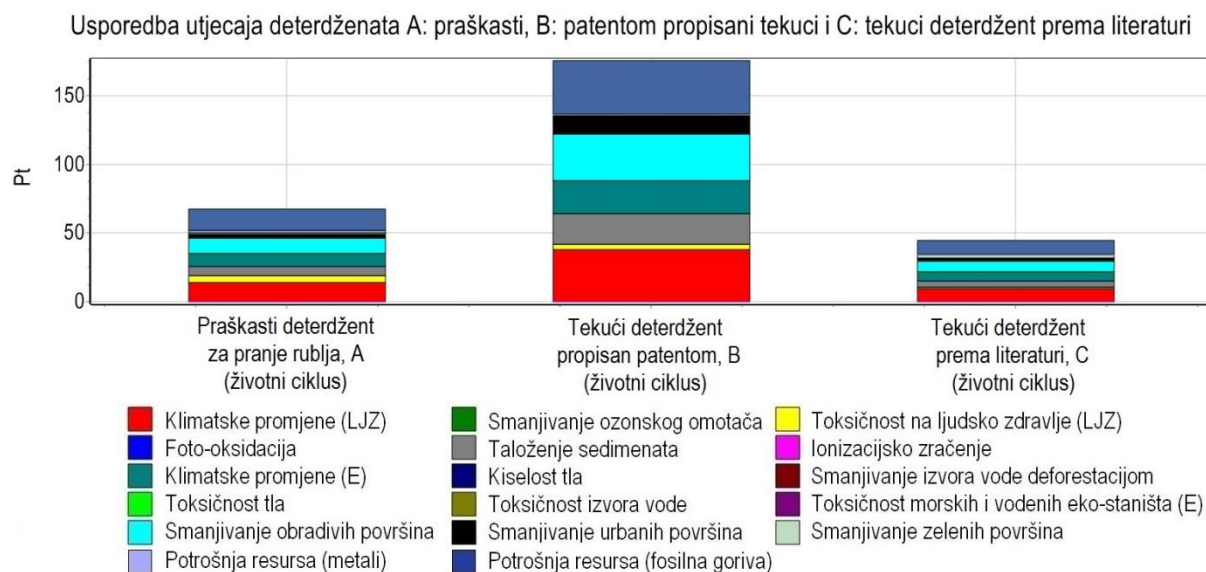
Zbog dvaju pretvarača ultrazvuka na jednom uređaju, potrošnja električne energije dvostruko je veća nego u slučaju samo jednog pretvarača ultrazvuka. Procijenjena potrošnja električne energije povoljnija je u slučaju koncepta pranja rublja C, nego u slučaju konceptata pranja rublja B, odnosno konceptata pranja rublja A i E.

Gallego-Juárez i drugi u radu [323] opisali su rezultate procesa ultrazvučnoga pranja i provjeru učinkovitosti pranja, a dostupni su i osnovni podatci o prototipu na osnovi kojih su doneseni zaključci o ključnim dijelovima prototipnoga rješenja i o materijalima komponenata.

Takozvani nestrukturirani tekući deterdženti za strojno pranje rublja češći su na tržištu [352], no sastav tzv. strukturiranih tekućih deterdženata prikladniji je za usporedbu ekološke prihvatljivosti praškastih i tekućih deterdženata u *LCA* studiji jer se njihov sastav može preciznije odrediti. Iako se pranjem toplom vodom i deterdžentom potroši više vode (35 litara/ciklus pranja) nego pranjem ultrazvukom i tekućim deterdžentom i vodom (10,6 litara/kilogram tekstila), udio kemijskih tvari *STTP* i *LAS* veći je u tekućini za pranje tekstila ultrazvukom iz rada Gallego-Juárez i drugih [323]. Utjecaji na okoliš sredstva za pranje u slučaju koncepta C veći su nego kod konceptata A i B. Uzroci su tomu veće koncentracije omekšivača vode (*STTP*) i punila (*LAS*) u sastavu tekućine za pranje (slika 5.12.).

Kako bi se postigla usporedivost koncepta pranja rublja C s ostalim konceptima pranja rublja u *LCA* studiji, pristupilo se definiciji koncepta C\_NEW kod kojeg je umjesto tekućine za pranje definirane u radu Gallego-Juárez i drugih [323] definiran sastav komercijalno dostupnoga tekućeg deterdženta prema [355] (tablica 5.7.).





Metoda procjene utjecaja na okoliš: ReCiPe Endpoint (H) V1.12 / Europe ReCiPe H/A / Infrastrukturni procesi isključeni iz analize

**Slika 5.12.** Usporedba utjecaja na okoliš: a) praškastog deterdženta (koncepti A i B); b) tekućeg deterdženta za pranje tekstila koji je propisan patentom [323]; c) tekućeg deterdženta za strojno pranje rublja

**Tablica 5.7.** Sastav tekućeg deterdženta za strojno pranje rublja

Sastojci u sastavu deterdženta [352]	Maseni udio sastojaka prema [352]	Maseni udio sastojaka (LCA studija)
linearni alkil-benzen sulfonat (LAS)	10 – 25 %	15 %
etoksilirani alkohol (AE11)	6 – 10%	9 %
zeolit, praškasti	15 – 30%	5 %
natrijev trifosfat (STPP)		20 %
alkoholni sulfat	0 – 5%	0,9 %
sapun	4 – 6%	5 %
fluorescentni izbjeljivač (DASI)	0,05 – 0,25 %	0,1 %
Voda	30 – 50 %	45 %

Kako nema podataka o materijalima za izradu prototipa koncepta C, pretpostavljena je lista materijala za njegovu izradu (tablica 5.8.). Na listi materijala prevladavaju nehrđajući čelik i aluminij, dok je pretpostavljeno da je udio polimera mnogo manji nego kod konceptata A i B.

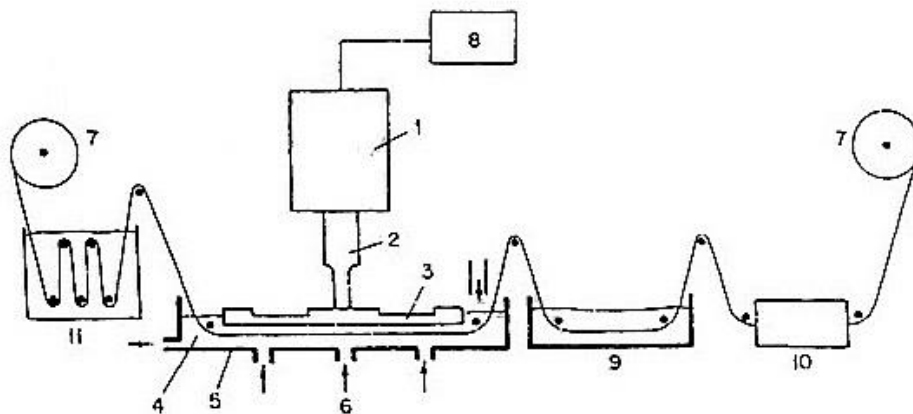
Pretpostavljeno je da je za izradu prototipa koncepta C potrebno triput više čelika i aluminija nego što je to potrebno za izradu perilice koncepta pranja rublja A. Isto je tako određeno za elektroničke komponente, dok je masa polipropilena nepromijenjena. Polipropilen ne prevladava listom materijala za izradu perilice koncepta C. Inače i malim

variranjem udjela polipropilena i elektroničkih komponenata moguće je dobiti znatno izmijenjene utjecaje na okoliš te time promijeniti rang ekološke prihvatljivosti koncepata.

**Tablica 5.8.** *Dijelovi sustava za ultrazvučno pranje tekstila u tekućem mediju [358]*

Oznaka	Dijelovi sustava za ultrazvučno pranje tekstila u tekućem mediju	Komada
1	piezoelektrični ili elektromagnetski generator (pretvarač) ultrazvučnih valova snage 200/600 W	2
2	mehanički pojačivač ultrazvuka	2
3	vibrirajuća ploča (emiter ultrazvučnih valova) – aluminijska ploča (titan legura dimenzije: 220 x 220 x 10 mm)	4
4	tekući medij za pranje (mješavina tekućeg deterdženta i vode)	1
5	spremnik	1
6	sustav zamjene tekućine za pranje	1
7	sustav kolotura za vođenje tekstila	1
8	električni motor	1
9	spremnik za ispiranje u vodi	1
10	sustav za tretiranje ultrazvučnim valovima bez tekućeg medija (funkcije: cijeđenje, otklanjanje vode)	1
11	sustav za prednamakanje	1

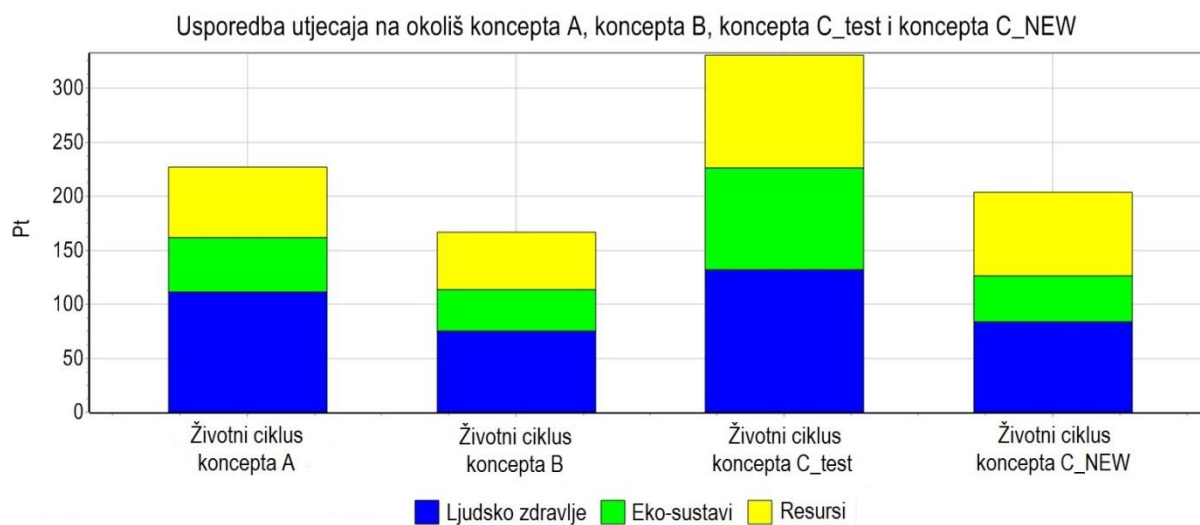
Oznake dijelova sustava prema patentu (slika 5.13.).



**Slika 5.13.** *Dijelovi sustava za ultrazvučno pranje tekstila prema patentu [358], oznake dijelova sustava: tablica 5.8.*

Kako nema pouzdanih podataka o listi materijala za perilicu koncepta C, pretpostavljen je najgori slučaj liste materijala za izradu prototipa koncepta C, pri čemu je masa osnovnih materijala za izradu perilice koncepta C triput veća nego za izradu perilice koncepta A. Slika 5.14. prikazuje usporedbu utjecaja na okoliš koncepata A, B i dviju varijanata koncepta C. U slučaju koncepta C\_NEW (slika 5.14.) nema neželjenih utjecaja na okoliš koji nastaju kod

koncepta C pri kojem je rabljena tekućina za pranje tekstila iz rada Gallego-Juárez i drugih [323].



**Slika 5.14.** Usporedba utjecaja na okoliš životnog ciklusa koncepta A, koncepta B, koncepta C\_test i koncepta C\_NEW

Utjecaji na okoliš koncepta C\_NEW manji su od utjecaja na okoliš koncepta A, te veći od utjecaja na okoliš koncepta B. Uzrok je tomu ekološki prihvatljivija potrošnja energije u fazi eksploatacije, no i nešto veća potrošnja materijala jer je koncept C osmišljen prema prototipu ultrazvučne perilice, a lista je materijala pretpostavljena na temelju liste materijala prethodnih generacija perilice rublja (perilice koncepta A). Valja imati na umu da je rekonstrukcijom moguće utjecaje na okoliš koji nastaju zbog utjecaja materijala od kojih je izrađen tehnički sustav smanjiti za do 50 % bez negativnih posljedica na funkcionalnost proizvoda. Malim izmjenama konstrukcije ultrazvučne perilice time bi se postigla ekološki prihvatljivija varijanta koncepta C, no ne možemo sa sigurnošću tvrditi da bi bila riječ i o ekološki prihvatljivijem konceptu od koncepta B.

### 5.3.5. LCA koncepta čišćenja rublja D<sup>a</sup> i D<sup>b</sup>

Koncept D<sup>a</sup> jest koncept čišćenja rublja sublimacijom peleta ugljikova dioksida, a koncept D<sup>b</sup> jest koncept čišćenja rublja ukapljenim ugljikovim dioksidom. Konceptijskom varijantom D<sup>a</sup> čišćenje rublja ostvaruje se usmjerenom strujom zraka i ugljikova dioksida. Ugljikov dioksid u krutom agregatnom stanju pohranjen je u obliku peleta. Rublje se pohranjuje u bubanj po uzoru na perilice koncepta pranja rublja A, B i E. Najvažniji dijelovi



uređaja za strojno čišćenje ugljikovim dioksidom jesu: motor, kompresor, spremnik ugljikova dioksida, regulator tlaka, komora za miješanje i mlaznice [359].

Rublje se čisti smjesom zraka i ugljikova dioksida. Ugljikov dioksid iz peleta sublimira u plin te se mlaznicama jednoliko raspršuje u bubanj na rublje. Parametri procesa čišćenja suhim ledom jesu: gustoća kuglica, protok zraka, brzina peleta i temperatura zraka [359].

Ugljikov dioksid u plinovitome stanju upotrebljuje se u prehrambenoj i kemijskoj industriji kao sredstvo za stvaranje inertne atmosfere. Ugljikov dioksid je nusprodukt procesa proizvodnje amonijaka (metan) i vodika.

Prema podacima iz kataloga uređaja za odmašćivanje i čišćenje površina peletima suhog leda [359], potrošnja peleta ugljikova dioksida iznosi 4 litre po ciklusu čišćenja. Pritom nisu navedene specifikacije poput dimenzija površine koju je moguće tretirati u jednom ciklusu, kao ni vrijeme standardnog ciklusa čišćenja. Sutanto [324] navodi primjer procesa čišćenja 17 kilograma rublja pri kojemu potrošnja ugljikova dioksida iznosi 2 kilograma.

U slučaju koncepta D<sup>b</sup> ugljikov dioksid u tekućem stanju nalazi se pod visokim tlakom u spremniku, što omogućuje da se veće količine plina pohrane za više ciklusa čišćenja [324]. Zrak se dobavlja se iz neposrednog okoliša tehničkog sustava te stlači, što omogućuje strujanje kojim se uklanjaju nečistoće s rublja.

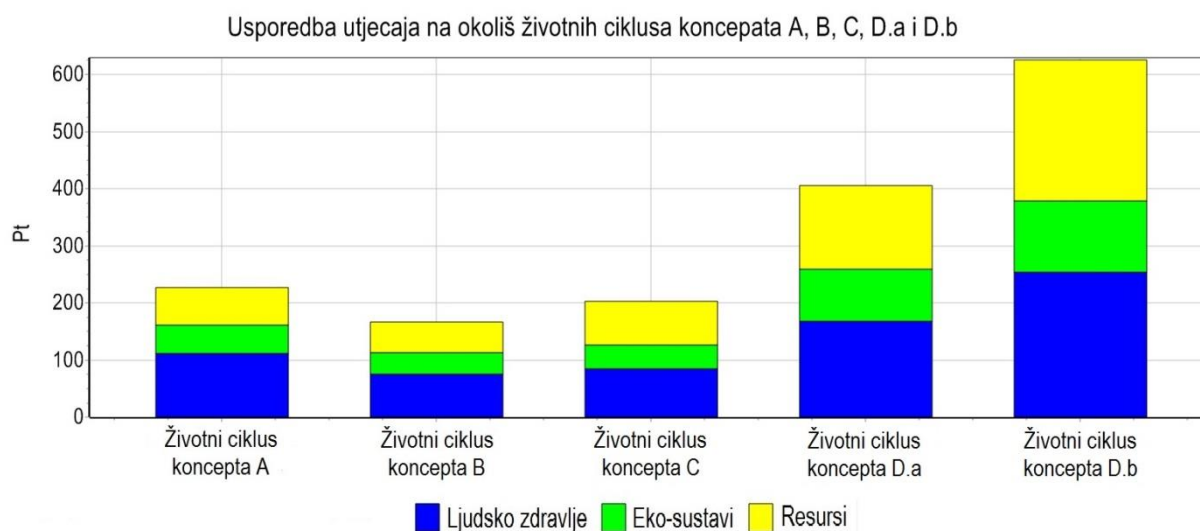
Za pranje 17 kilograma potrebno je 120 kilograma ukapljenoga ugljikova dioksida [324]. Nakon završetka procesa 'suhoga' pranja ugljikovim dioksidom, 2 kilograma ugljikova dioksida u plinovitome stanju otpušta se u okolinu, a ostatak ugljikova dioksida u tekućemu stanju vakuumskom se pumpom odvodi do destilacijske jedinice (slika 4.22.).

Zbog velikog protoka smjese zraka i ugljikova dioksida koji se ostvaruje na mlaznicama usmjerenima na rublje generira se buka (razina buke od 85 dB do 130 dB [360]). Buka je sekundarni efekt procesa čišćenja suhim ledom koji nastaje zbog protoka i brzine strujanja plinovite smjese zraka i ugljikova dioksida kroz mlaznicu (koncept D<sup>a</sup>).

Kako se čišćenje obavlja u zatvorenom prostoru bubnja perilice, potrebna je ventilacija. Ugljikov dioksid nije toksičan ako se omogući pravodobno i postupno ispuštanje ugljikova dioksida u neposredni okoliš. Kratkotrajna izloženost koncentraciji od 2 % ne djeluje štetno na ljudsko zdravlje. Veće koncentracije ugljikova dioksida mogu smanjiti koncentraciju kisika u zraku, što otežava disanje, a može uzrokovati i gušenje. Pri istjecanju ugljikova dioksida iz bubnja pod tlakom stvara se statički elektricitet koji može uzrokovati paljenje lako zapaljivog materijala u blizini perilice.

Rotacija bubnja u koji je pohranjeno rublje ostvaruje se na isti način kao kod koncepata A, B i E, te je stoga moguće procijeniti potrošnju energije za mehaničko djelovanje bubnja na rublje pohranjeno u bubnju na 0,19 kWh (tablica 5.4.).

Masa uređaja koncepta D<sup>a</sup> može se procijeniti na zbroj uređaja koji omogućuju njegovu punu funkcionalnost, a to su kompresor, uređaj za čišćenje peletima ugljikova dioksida [325] i ostali dijelovi uređaja među kojima masom prevladava bubanj perilice. Ukupna je masa uređaja procijenjena na 150 kilograma. Sutanto [324] navodi primjer uređaja za pranje ukapljenim ugljikovim dioksidom kao ekološki prihvatljivu alternativu u kemijskim čistionicama. Masa je uređaja 3600 kilograma. Potrošnja električne energije je 2,2 kWh po ciklusu pranja. Ovaj parametar procesa pranja uzet je u obzir pri procjeni životnog ciklusa koncepta D<sup>b</sup> (slika 5.15.).



Metoda procjene utjecaja na okoliš: ReCiPe Endpoint (H) V1.12 / Europe ReCiPe H/A / Infrastrukturni procesi isključeni iz analize

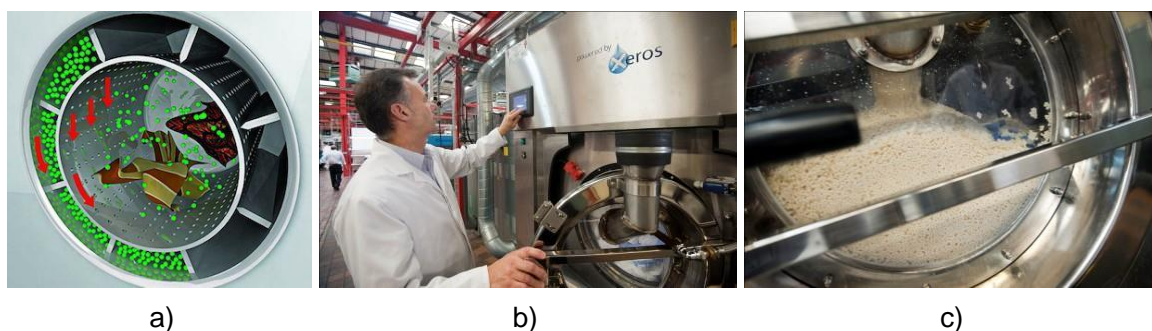
**Slika 5.15.** Usporedba utjecaja na okoliš koncepata A, B, C, D<sup>a</sup> i D<sup>b</sup>

### 5.3.6. LCA koncepta pranja rublja E

Koncept pranja rublja E jest koncept pranja polimernim kuglicama, praškastim deterdžentom za strojno pranje rublja i vodom.

Za pranje polimernim kuglicama preporučuje se rabiti sljedeće omjere vode i tekstila: 1,75 : 1, 1,5 : 1, 1,2 : 1 i 1,1 : 1 [361]. Potrošnja je polimernih kuglica u omjeru 2 : 1 na rublje. Za pranje 4,5 kilograma rublja troši se 9 kilograma polimernih kuglica. Polimerne su kuglice reciklabilne pa se mogu uporabiti za oko 30 pranja. Nakon toga je istrošene polimerne kuglice

potrebno zamijeniti novima. Materijal polimernih kuglica jest najlon [361]. Slika 5.16. prikazuje skicu i uređaj za pranje rublja polimernim kuglicama.



**Slika 5.16.** a) Skica polimernih kuglica u bubnju perilice [362]; b) Prikaz upravljanja perilicom Xeros [363]; c) Prikaz polimernih kuglica u bubnju perilice Xeros [363]

Potrošnja električne energije zbog mehaničkog djelovanja na tekstil usporediva je potrošnji energije procesa pranja toplom vodom (30 °C) i deterdžentom (slika 5.6.) [354]. Rotacijom bubnja ostvaruju se centripetalne sile kojima se djeluje na polimerne kuglice i rublje u bubnju. Pritom se postižu brzine rotacije od oko 500 okr./min tijekom prvog dijela pranja, zatim 40 i 60 okr./min tijekom srednje faze ciklusa pranja i 180 okr./min za posljednju fazu procesa pranja tijekom koje se obavljaju odvajanje polimernih kuglica od tekstila i centrifuga, odnosno cijedenje tekstila u bubnju.

Proces pranja polimernim kuglicama usporediv je s procesom pranja deterdžentom i toplom vodom (30 °C) glede potrošnje električne energije potrebne za ostvarivanje mehaničkoga djelovanja na polimerne kuglice i tekstil u bubnju, vremenu potrebnom za jedan ciklus pranja te po potrošnji energije za zagrijavanje vode (30 °C) u prvom dijelu ciklusa pranja ako je tako specificirano opisom koncepta.

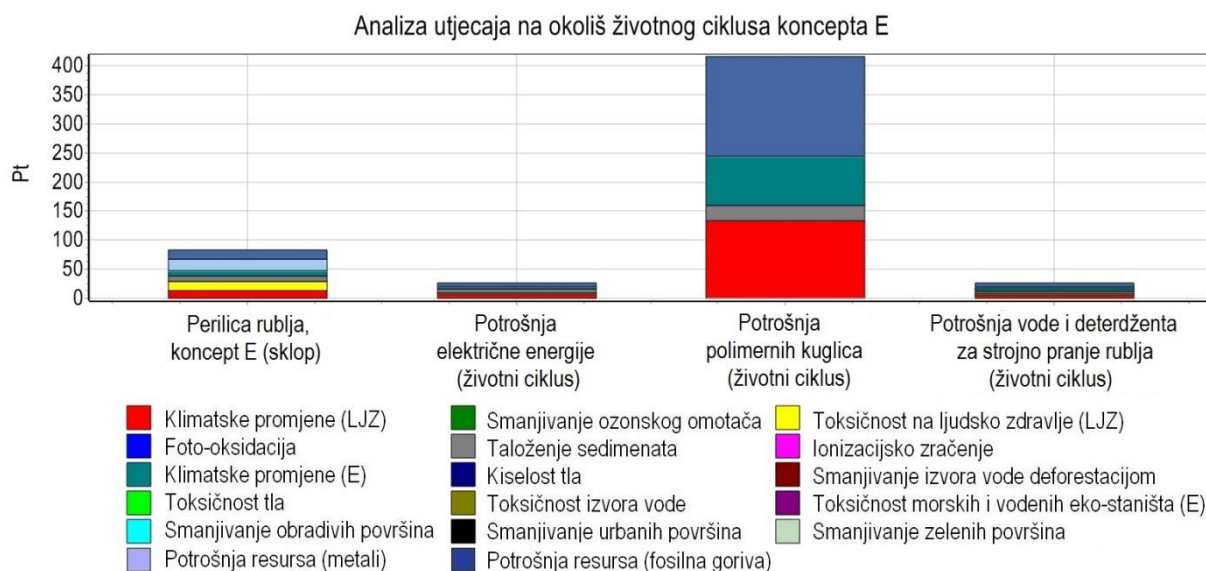
Patentom US2015128358A1 [361] opisan je test efektivnosti pranja polimernim kuglicama. Testom je definirana potrošnja vode, deterdženta i polimernih kuglica po ciklusu pranja (4 do 5 kilograma rublja). Test je proveden u perilici rublja kapaciteta 4,3 kilograma tekstila, što je u skladu s parametrima procesa pranja za procjenu životnog ciklusa (4 do 5 kilograma rublja). Potrošnja vode za namakanje tekstila u prvom dijelu procesa pranja iznosi 4 litre, nakon čega se rublje namače s dodatne 4 litre vode i standardnom dozom deterdženta od 75 grama. Za transport polimernih kuglica u bubanj perilice potrebno je 14,5 litara vode. U završnom dijelu procesa potrebno je dodatnih 15 litara vode za ispiranje i još 5 litara vode za ispiranje polimernih kuglica u zasebnom spremniku. Ukupno su testom propisane 43 litre vode za jedan ciklus pranja. Konstrukcija perilice E ne razlikuje se mnogo od konstrukcije

perilice koncepta A te je pretpostavljeno da se sastoji od istih materijala kao perilica A, no u dvostrukoj količini, osim integriranih elektroničkih sklopova čija je masa jednaka svim analiziranim konceptima u ovoj procjeni i iznosi 2,35 kilograma.

Komercijalizaciju koncepta E nalazimo u obliku automatske perilice tekstila u industriji, hotelijerstvu i u drugim granama djelatnosti pranja tekstila na veliko i za američko tržište (slika 5.17.). Stoga su i parametri koji su definirani patentom i specificirani testom učinkovitosti pranja tekstila, prilagođeni takvoj primjeni.



Slika 5.17. Xeros perilica rublja [364]



Metoda procjene utjecaja na okoliš: ReCiPe Endpoint (H) V1.12 / Europe ReCiPe H/A / Infrastrukturalni procesi isključeni iz analize

Slika 5.18. Analiza utjecaja na okoliš životnog ciklusa koncepta E

Utjecaj na okoliš zbog životnog vijeka polimernih kuglica čini 58 % svih utjecaja na okoliš koncepta pranja rublja polimernim kuglicama, deterdžentom i vodom (slika 5.18.).

## 5.4. Rezultati procjene utjecaja na okoliš i rangiranje koncepata

Tumačenje rezultata *LCA* prema normi ISO 14044 [85] podrazumijeva analizu pretpostavki o proizvodu i njegovu životnom ciklusu, ulaznim podacima te odabranim metodama i tehnikama procjene utjecaja na okoliš. Kao softverska potpora unosu i obradi podataka *LCA* uporabljen je softver *SimaPro*<sup>TM</sup> [87]. Odabrana metoda procjene utjecaja na okoliš jest metoda *ReCiPe*<sup>TM</sup> [89] kojom se stvari iz inventara proizvoda klasificiraju prema učinku na okoliš, normaliziraju te prikazuju prema kategorijama utjecaja na okoliš.

Podatci iz inventara životnog ciklusa grupiraju se u kategorije (razrede) utjecaja na okoliš kako bi se procijenile razine štetnosti pojedinih stvari. Neke stvari mogu biti svrstane u više od jedne kategorije utjecaja na okoliš. Primjerice, kemijski spojevi dušikovih oksida su toksični, lako se pretvaraju u kiselinu i uzrokuju deforestaciju te time pridonose kategorijama utjecaja toksičnosti, deforestacije i kiselosti tla.

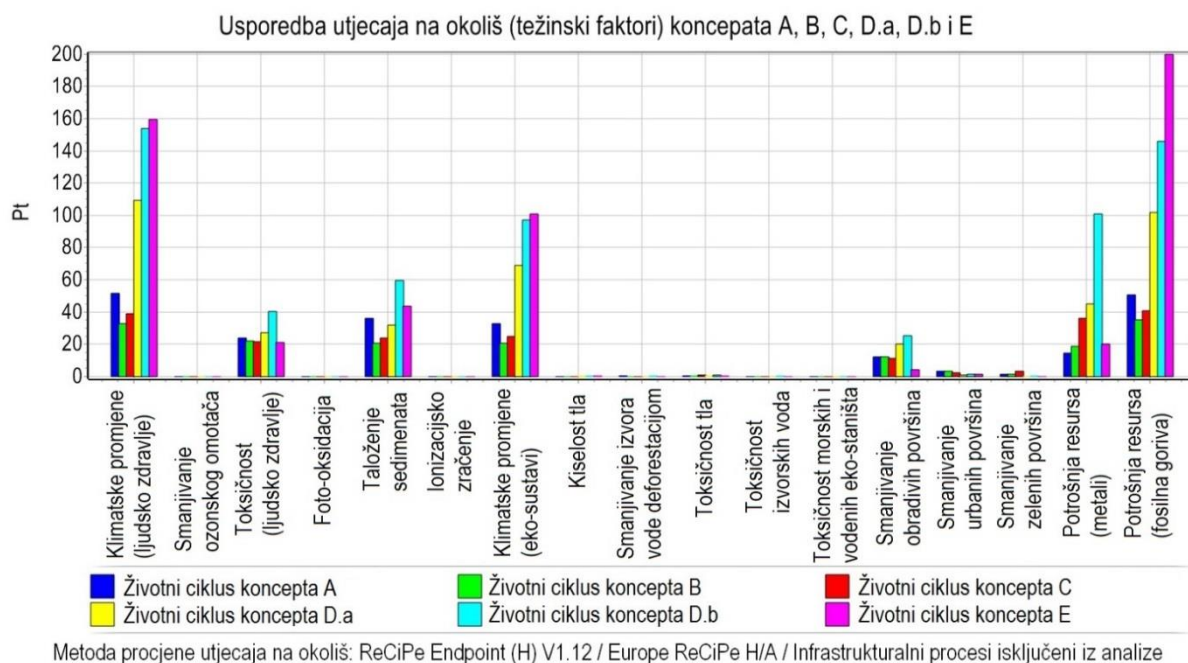
Tumačenje rezultata procjene jednostavno je ako rezultati upućuju na veći utjecaj na okoliš jednog proizvoda s obzirom na veći broj kategorija utjecaja na okoliš. No, ako procjena upućuje primjerice na rezultate visoke kiselosti jednog proizvoda te na klimatske promjene što ih uzrokuje drugi proizvod, teško je usporediti razine štetnosti pojedinih kategorija utjecaja na okoliš [226]. Slika 5.19. prikazuje rezultate procjene utjecaja na okoliš perilica rublja prema kategorijama srednjih utjecaja na okoliš.

Kategorije srednjih utjecaja jesu kategorije utjecaja na okoliš kao što su klimatske promjene, kiselost tla, toksičnost, itd. Utjecaji na okoliš grupirani prema kategorijama zdravlje ljudi, ekosustav i prirodni resursi kategorije su krajnjih utjecaja. Rezultati procjene krajnjih utjecaja podrazumijevaju veću razinu nesigurnosti u usporedbi s rezultatima procjene srednjih utjecaja. Međutim, procjena krajnjih utjecaja često je praktičnija za donositelje odluka u razvojnome procesu i za dionike koje zanima krajnji rezultat usporedbe, a ne parcijalni doprinosi kategorijama srednjih utjecaja na okoliš.

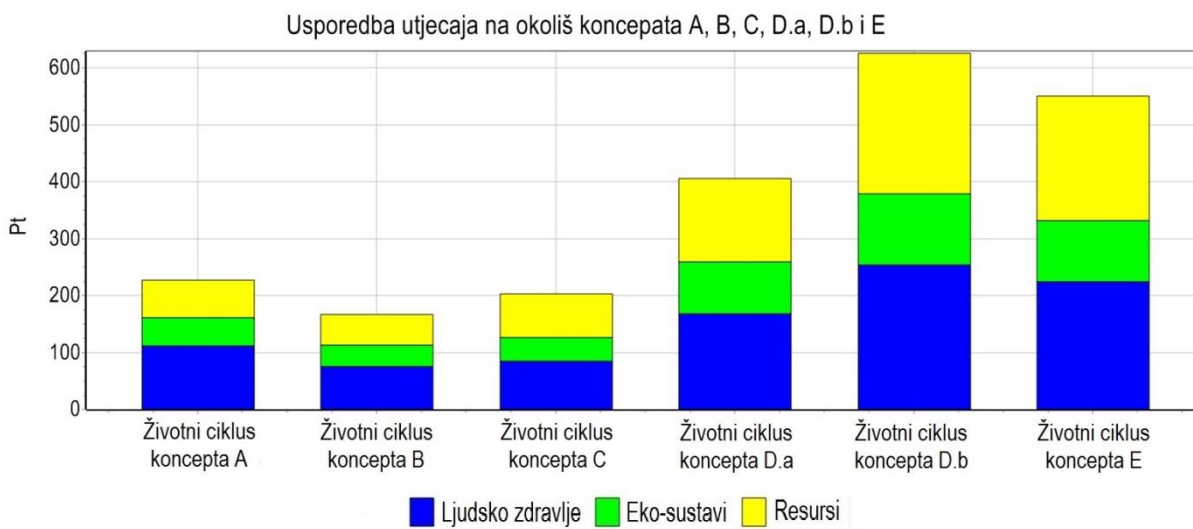
Slika 5.19. prikazuje jasnu podjelu na koncepte s većim utjecajima na okoliš u kategorijama klimatske promjene (ljudsko zdravlje), klimatske promjene (eko-sustavi) i potrošnja resursa (fosilna goriva). To su koncepti perilice rublja E i D<sup>b</sup>.

Slika 5.20. prikazuje rezultate procjene utjecaja na okoliš koncepata perilica rublja nakon primjene težinskih faktora i normalizacije. Težinski faktori, modeli i metode kojima se rezultati inventara životnog ciklusa prikazuju u obliku kategorija utjecaja na okoliš nisu

strogo standardizirani ili propisani ISO standardom [1], nego su dani na izbor procjeniteljima [227].



**Slika 5.19.** Usporedba utjecaja na okoliš koncepata (težinski faktori, prikaz po kategorijama srednjih utjecaja)



**Slika 5.20.** Usporedba utjecaja na okoliš koncepata A, B, C, D<sup>a</sup>, D<sup>b</sup> i E

Kvantifikacija utjecaja na okoliš postiže se s pomoću inventara životnog ciklusa u kojemu su zabilježeni svi resursi, ulazni podatci o potrošnji energije i materijala te emisije i izlasci materijala, kemijskih spojeva i tvari, te neiskorištena energija za ukupni životni ciklus



„od kolijevke do groba“ proizvoda. Podatci u inventaru životnog ciklusa sakupljeni su za pojedine faze životnog ciklusa proizvoda, procese vađenja i proizvodnje sirovina od kojih su proizvedeni materijali za izradu proizvoda, zatim podatci o proizvodnim postupcima i potrošnji energije i materijala (npr. vode u proizvodnji), distribuciji, transportu (prijevozu), eksploataciji i odlaganju proizvoda te recikliranja, uporabe ili drugih mogućnosti odlaganja proizvoda [28].

Potrošnja energije potrebne za formulaciju deterdženta za strojno pranje rublja u slučaju koncepata A, B, C i E zanemarena je jer čini samo mali dio ukupne potrošnje energije [350]. Utjecaj na okoliš zbog eksploatacije deterdženta za strojno pranje rublja uzet je u obzir za procjenu životnog ciklusa koncepata i to u fazi eksploatacije, odnosno procjene ukupnih utjecaja tijekom životnog ciklusa koncepata.

Pri procjeni utjecaja na okoliš koncepta ultrazvučnoga pranja rublja tekućim deterdžentom i vodom (C\_patent) kategorije srednjih utjecaja na okoliš kao što su deforestacija, smanjivanje zelenih površina i obradivoga tla te toksičnost pitkih voda pokazuju veće relativne udjele utjecaja na okoliš zbog veće koncentracije fosfata u sastavu tekućeg deterdženta definirana patentom.

Europski parlament i Vijeće Europske unije propisali su ograničenja uporabe fosfata u deterdžentima za pranje rublja koji se upotrebljavaju u kućanstvima [365]. Ovom odredbom o ograničavanju uporabe fosfata u deterdžentima za pranje rublja i deterdžentima za strojno pranje posuđa koji se uporabljaju u kućanstvu nastoji se smanjiti utjecaj fosfata iz deterdženata na rizik od eutrofikacije te sniziti troškovi odstranjivanja fosfata u uređajima za pročišćavanje otpadnih voda. Takve uštede nadilaze trošak preformulacije (izmjenjivanja sastava postojeće mješavine) deterdženata za pranje rublja zamjenama za fosfate.

2014. g. dopušteni udio *STTP-a* u sastavu deterdženata ograničen je na do 14 % sastava deterdženata [366]. Za potrebe usporedbe konceptijskih rješenja iz studije slučaja, udio *STTP-a* i *LAS-a* prilagođen je novim zakonskim regulativama, što je rezultiralo procjenom utjecaja na okoliš koncepta C\_test. To je stoga kako bi se ostvarila usporedivost konceptijskih rješenja tehničkih sustava. Naime, kod prototipnog rješenja C\_prototip nije unaprijed vođena briga o ekološkoj prihvatljivosti tekućeg deterdženta za pranje [285].

Pri sastavljanju inventara životnog ciklusa potrebno je donijeti brojne pretpostavki o tehnološkim postupcima proizvodnje, potrošnji energije i materijala, emisijama i otpadu na

kraju životnog vijeka proizvoda. Tablica 5.9. prikazuje pretpostavljene koeficijente udjela materijala u listi materijala perilica.

**Tablica 5.9.** *Lista materijala perilica – koeficijenti za procjenu liste materijala*

Naziv koncepta	Koeficijent kojim je množena masa materijala iz liste materijala koncepta A [279] i koncepta B [355]
<b>Koncept A</b>	1
<b>Koncept B</b>	tablica 5.5.
<b>Koncept C_NEW</b>	3
<b>Koncept D<sup>a</sup></b>	4
<b>Koncept D<sup>b</sup></b>	10
<b>Koncept E</b>	+25 %

Inventar životnog ciklusa sadržava podatke o svim ulascima i izlascima energije i materijala procesa u životnom ciklusu proizvoda, uključujući emisije i otpad. Ti podatci mogu proizlaziti iz različitih izvora u literaturi (kao što je i ovdje slučaj), zbog čega kvaliteta ulaznih podataka može varirati.

Prema istraživanju životnog ciklusa perilice rublja u radu Rüdenuera i drugih [279], može se zaključiti o tome da se životni ciklus analizirane perilice može podijeliti na dvije osnovne faze: proizvodnju i eksploataciju. Udio utjecaja na okoliš u fazi eksploatacije visokih je 64,8 %, a udio utjecaja na okoliš u fazi proizvodnje iznosi 35,2 %, od čega 33,3 % čini eksploatacija sirovina za izradu materijala proizvoda. Zbog toga je opseg provedene procjene životnog ciklusa uključivao proizvodnju materijala prema listi materijala koja je procijenjena za svaki koncept zasebno, a, prema podacima iz literature o masi i materijalima komponenata uređaja. U procjenu utjecaja na okoliš nije uključena potrošnja energije zbog formulacije deterdženta jer, prema Saouteru i van Hoofu [350], riječ je o maloj potrošnji energije koja ima zanemarivi udio u ukupnim utjecajima na okoliš perilice rublja.

Zanemarivo je odstupanje podataka o ukupnoj potrošnji električne energije u radu Rüdenuera i drugih [279] i podataka o potrošnji električne energije koncepta A koji su iskorišteni u ovom istraživanju. Prema procjeni životnog ciklusa provedenoj u sklopu ovog istraživanja, životni je ciklus određen brojem ciklusa pranja u fazi eksploatacije koji iznosi 2000 ciklusa, a što je nešto manje od broja ciklusa koji je definiran u radu Rüdenuera i drugih [279].



Prema Rüdeneru i drugima [279], faza kraja životnog vijeka koja uključuje recikliranje ili oporabu proizvoda, ima mali udio u ukupnoj slici utjecaja na okoliš. Riječ je o udjelu -8,2 % u ukupnim utjecajima na okoliš koji se odnose na fazu kraja životnog ciklusa proizvoda. Negativni predznak upućuje na pozitivne (poželjne) utjecaje na okoliš.

O kandidatima za recikliranje nije jednostavno zaključiti samo na temelju liste materijala jer komponente koje imaju visoki stupanj reciklabilnosti ne moraju biti ekonomski isplative za recikliranje. Komponente od čelika kao što je primjerice kućište ili bubanj imaju pravo prvenstva da budu reciklirane, zatim motori, elektronički kabeli, transformatori itd. S druge strane, integrirani elektronički sklopovi i ABS prvi su na listi za ekodizajn, odnosno rekonstrukciju i poboljšavanje ekološke prihvatljivosti, jer su njihovi utjecaji na okoliš među najvećima, a ekonomičnost i reciklabilnost su male [367].

Utjecaji na ekosustav, ljudsko zdravlje i potrošnju resursa koje se pojavljuju zbog buke te kao posljedica utjecaja na okoliš koji imaju procesi povezani sa sustavom odvodnje sive vode nisu uzeti u obzir u ovoj studiji utjecaja na okoliš koncepta pranja rublja. Utjecaji na okoliš koji se mogu otkriti proučavanjem posljedica na ekosustav, ljudsko zdravlje i potrošnju resursa, a koji postaju mjerljivi tek nakon dužeg razdoblja nisu obuhvaćeni granicom sustava provedene *LCA* studije. Uobičajeno se takvi utjecaji na okoliš uzimaju u obzir samo ako su posebno bitni za vrednovanje i usporedbu proizvoda te ako je procjenu njihova utjecaja moguće provesti u zadanom vremenu, s raspoloživim informacijama o proizvodu i bez dodatnih troškova. U poduzećima koja se bave konstruiranjem i razvojem proizvoda, najčešće se ne provode takva, dodatna istraživanja utjecaja na okoliš, a zbog toga što su takva *LCA* istraživanja vremenski i resursno prezahtjevna za razvojna poduzeća.

Kvalitativne, semikvantitativne, kvalitativno-kvantitativne i kvantitativne metode vrednovanja ekološke prihvatljivosti nisu potpuno prilagođene vrednovanju koncepta koji su originalnog dizajna, konceptima pranja rublja.

Kritike na metodologiju procjene životnog ciklusa mogu se podijeliti prema pojedinim koracima *LCA* metodologije (tablica 5.10.). Tijekom definiranja ciljeva i opsega studije, potrebno je obratiti pozornost na izbor funkcionalne jedinice, definiranje opsega studije i granica razmatranog sustava, definiranje društvenih i ekonomskih pokazatelja utjecaja na okoliš, te razmatranje alternativnih scenarija životnog ciklusa proizvoda [367].

Pri analizi inventara životnog ciklusa, potrebno je razmotriti posljedice odluka koje se tiču kvalitete podataka, dodjeljivanja generičkih procesa iz licenciranih baza podataka, te

odstupanja zbog specifičnosti tehnoloških procesa uključenih u inventar životnog ciklusa [368]. Odstupanja u kvaliteti rezultata procjene mogu proizlaziti iz odabira kategorija utjecaja na okoliš, pretpostavki o geografskoj i prostornoj određenosti utjecaja na okoliš (zbog specifičnosti tehnoloških procesa uključenih u inventar životnog ciklusa), pretpostavke o lokalnim utjecajima na okoliš i specifičnostima lokalnog okoliša, te pretpostavke o trajanju izloženosti okoliša utjecajima na njega. Pri interpretaciji rezultata studije procjene životnog ciklusa potrebno je donijeti odluke o težinskim faktorima važnosti utjecaja na okoliš koji su predloženi kategorijama utjecaja na okoliš te uključiti procjenu nesigurnosti zbog navedenih pretpostavki i ograničenja uvjetovanih metodološkim koracima studije [369]. Tablica 5.10. prikazuje ograničenja *LCA* metode.

**Tablica 5.10.** Metodološki koraci procjene životnog ciklusa (*LCA*) i uzroci mogućih odstupanja i nesigurnosti pri generiranju rezultata procjene [368], [369]

Koraci <i>LCA</i>	Mogući problemi povezani s provedbom procjene životnog ciklusa te uzroci mogućih odstupanja u rezultatima i kvaliteti procjene
<b>1. Definiranje cilja i opsega studije</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• izbor funkcionalne jedinice</li> <li>• definicija opsega studije</li> <li>• društveni i ekonomski pokazatelji utjecaja na okoliš koji su uključeni ili isključeni iz studije</li> <li>• razmatranje ili zanemarivanje alternativnih scenarija životnog ciklusa proizvoda</li> </ul>
<b>2. Analiza inventara životnog ciklusa</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• alokacija procesa (dodjeljivanje utjecaja na okoliš obzirom na pretpostavke o uzrokovanim utjecajima na okoliš)</li> <li>• kriteriji prema kojima se zanemaruju određeni procesi i faze životnog ciklusa</li> <li>• specifičnosti tehnoloških procesa uključenih u inventar životnog ciklusa (regionalne, vremenske, kulturološke)</li> </ul>
<b>3. Procjena utjecaja na okoliš</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• izbor kategorija utjecaja na okoliš i ograničenja zbog izbora metodologije procjene utjecaja na okoliš</li> <li>• varijantnost rezultata zbog odstupanja s obzirom na geografske i prostorne određenosti utjecaja na okoliš</li> <li>• odstupanje rezultata s obzirom na lokalne utjecaje na okoliš koji su specifični za lokalni okoliš</li> <li>• dinamika promjena u okolišu zbog djelovanja utjecaja na okoliš i prisutnosti emisija i otpada u okolišu</li> <li>• trajanje utjecaja na okoliš, odnosno specifičnosti zbog vremenske izloženosti okoliša utjecajima na okoliš</li> </ul>
<b>4. Tumačenje rezultata</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• težinskih faktora važnosti kategorija utjecaja na okoliš i kvalitativno vrednovanje</li> <li>• nesigurnosti pri odlučivanju</li> </ul>
<b>Svi koraci metodologije</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• dostupnost i kvaliteta podataka za procjenu životnog ciklusa</li> </ul>

## 6. VALIDACIJA PREDLOŽENE METODE I VERIFIKACIJA ISTRAŽIVANJA

*Validacija kriterija ekološke prihvatljivosti i predložene metode vrednovanja provedena je radi provjere korisnosti, konzistentnosti i učinkovitosti kriterija i metode. Kriteriji ekološke prihvatljivosti namijenjeni su konceptualnoj fazi konstruiranja, a predložena metoda služi vrednovanju i usporedbi ekološke prihvatljivosti konceptijskih varijanti tehničkih sustava. Validacija je provedena primjenom metode na primjerima koncepata pranja rublja i koncepata stolnog sata budilice. Rezultati vrednovanja predloženom metodom uspoređeni su s rezultatima studije kvalitativnoga vrednovanja ekološke prihvatljivosti, zatim vrednovanja procjenom životnog ciklusa i vrednovanja na osnovi u literaturi objavljene LCA studije.*

---

### 6.1. Postupak validacije predložene metode

Metodologije, metode i alati znanstveni su doprinosi istraživanju u području konstruiranja i razvoja tehničkih sustava. Validaciju metoda konstruiranja i razvoja tehničkih sustava često nije moguće provesti na „formalan, precizno točan, strogo propisan i kvantitativan“ način [77]. To je stoga što se tvrdnje i pretpostavke istraživanja, osim na matematičkom modeliranju, temelje na subjektivnim tvrdnjama i argumentiranim vrijednosnim prosudbama istraživača, eksperata i sudionika u istraživanju.

Validacija metoda provodi se radi provjere svrsishodnosti, korisnosti i primjenjivosti metoda za propisanu namjenu. Za potrebe validacije u doktorskom radu predložene metode, odabran je metodološki pristup validaciji metoda u području konstruiranja i razvoja tehničkih sustava – *validacijski kvadrat* [77]. Prema metodologiji *validacijskog kvadrata*, validacija metode postupak je u kojem se provjeravaju svrsishodnost i korisnost predložene metode [77]. Postupak validacije sastoji se od provjere unutarnje konzistentnosti (efektivnost) i vanjske relevantnosti (efikasnost) predložene metode.

Validacija se provodi tako da se propituje prikladnost metode za njezinu deklariranu namjenu. Prije provedbe validacije navode se osnovne informacije o metodi [370].

- Svrha (namjena) metode. *Predložena metoda jest metoda vrednovanja ekološke prihvatljivosti za konceptualnu fazu razvoja tehničkih sustava.* Metoda je namijenjena usporedbi (rangiranju) koncepata prema kriterijima ekološke prihvatljivosti koji su propisani metodom. Metoda je primjenjiva za koncepte tehničkih sustava koji su originalan dizajn. Metoda je namijenjena konceptima koji su tehnički sustavi, a nije namijenjena sustavima proizvod – usluge i sociotehnički sustavi. Metoda nije namijenjena tomu da bude jedina metoda vrednovanja koncepta u konceptualnoj fazi zato što metodom nisu propisani ostali, za odabir koncepta važni kriteriji.
- Područje primjene metode. *Predložena metoda namijenjena je konceptualnoj fazi razvoja tehničkih sustava.* Metoda nije primjenjiva u fazama razvoja kad su koncepti u fazi idejne razrade (nedostatak informacija o konceptima) ili u fazi konstrukcijske razrade (konceptijsko se rješenje više ne mijenja). Metoda nije namijenjena razvoju kompleksnih tehničkih sustava jer takvi sustavi zahtijevaju specifičan razvojni proces i metode.
- Vrsta očekivanog rezultata. *Predložena metoda rezultira rangiranjem skupa koncepta prema ekološkoj prihvatljivosti.* Zbog toga što se temelji na kvalitativnim kriterijima, subjektivnoj procjeni tijekom dodjeljivanja ocjena prema kriterijima te kvantitativnoj tehnici agregiranja kriterija, metoda je kvalitativno-kvantitativna. Metodom nisu propisani ostali kriteriji vrednovanja važni za odabir koncepta. Rezultatima predložene metode valja se koristiti kao ulaznim podacima metode vrednovanja koncepata u konceptualnoj fazi razvoja tehničkih sustava. Predložena

metoda ne uzima u obzir utjecaje na okoliš koji nastaji u fazama životnog ciklusa prije eksploatacije proizvoda i na kraju životnog vijeka proizvoda.

## 6.2. Validacija predložene metode

Postupak validacije predložene metode temelji se na provjeri unutarnje konzistentnosti i vanjske relevantnosti [77], a sastoji se od šest koraka.

Validaciju unutarnje konzistentnosti [77] predložene metode čine sljedeća tri koraka.

### 1. *Provjera valjanosti elemenata metode*

Validacija individualnih konstrukata koji integrirani zajedno čine metodu provodi se preko obrazloženja pojedinačnih elemenata metode. Obrazloženje elemenata metode potvrđuje se navodima iz literature, čime se daje znanstvena utemeljenost tvrdnji. Pojedinačne (konstruktivne) elemente predložene metode čini pet kriterija ekološke prihvatljivosti i tehnika sume rangova [90].

Analiza kriterija ekološke prihvatljivosti koji su propisani metodama vrednovanja ekološke prihvatljivosti polazna je točka za definiranje kriterija ekološke prihvatljivosti propisanih predloženom metodom.

Analizirane su sljedeće metode: *Dominance Matrix* [168], *Philips Fast Five Awareness* [177], *Eco-compass* [187], *LiDS-Wheel* [147], *Eco-products tool* [178], *Econcept Spiderweb* [3], *ERPA matrix* [20], *Eco-Design Value guidelines* [82] i *Design for Environment guidelines* [170]. Spomenute su metode namijenjene konceptualnoj fazi razvoja tehničkih sustava. Poznavanje životnog ciklusa važan je preduvjet primjene metoda, no informacije o životnom ciklusu najčešće nisu dostupne tijekom konceptualne faze [2].

Kriteriji ekološke prihvatljivosti implementirani u analiziranim metodama kvalitativni su i time prilagođeni vrednovanju u konceptualnoj fazi. No, dodjeljivanje numeričke vrijednosti konceptu ili atributu koncepta pri vrednovanju mora biti temeljeno na smjernicama ili uputama [46], što je zahtjev koji nije zadovoljen u slučaju analiziranih metoda. Dakle, ne postoji potpora u obliku smjernica ili uputa kojima bi se omogućilo dodjeljivanje kvalitativnih ocjena ekološke prihvatljivosti obilježju ili značajki koncepta i okrupnjavanje ukupne ocjene ekološke prihvatljivosti koncepta.

Na temelju nabrojenih nedostataka i ograničenja postojećih metoda pristupilo se definiranju kriterija ekološke prihvatljivosti i metode vrednovanja ekološke prihvatljivosti za

konceptualnu fazu. Predložena se metoda temelji na pet kriterija ekološke prihvatljivosti. Kriteriji su kvalitativni, no propisane su vrijednosne ljestvice kojima se kvalitativne ocjene (prema svakom od pet kriterija vrednovanja) agregiraju u jednu kvantitativnu ocjenu – rang koncepta. Tablica 6.1. i tablica 6.2. prikazuju elemente predložene metode.

**Tablica 6.1.** Vrednovanje elemenata predložene metode [83] – 1. dio

Elementi metode	Obrazloženje
<b>Kriterij ekoefektivnosti pretvorbi energije i signala</b>	<p>Pretvorbe energije, materijala i signala značajke su karakteristične za radni princip konceptijskoga rješenja te su kriterij vrednovanja u konceptualnoj fazi razvoja tehničkih sustava. Kriterij je inspiriran prijedlogom Pahla i drugih [72] o razmatranju varijantnih radnih principa sa svrhom razvoja inovativnih proizvoda.</p> <p>Temelj vrednovanja prema ovom kriteriju jesu faktori solarne transformabilnosti oblika energije [70]. Faktori solarne transformabilnosti oblika energije [70] definirani su na temelju hijerarhijskog modela oblika energije [243] i solarne transformabilnosti oblika energije [308].</p> <p>Prema principu maksimiranja snage [309], pozitivno se vrednuju pretvorbe kojima 'niži' oblici energije (oblici energije s nižim faktorom solarne transformabilnosti) služe za ostvarivanje oblika energije 'višeg' oblika energije (oblika energije s višim faktorom solarne transformabilnosti).<sup>1</sup></p>
<b>Kriterij broja pretvorbi energije i signala</b>	<p>Kriterij inspiriran prijedlogom Pahla i drugih [72] o razmatranju varijantnih radnih principa sa svrhom razvoja inovativnih proizvoda. Pretvorbe energije, materijala i signala značajke su karakteristične za radni princip konceptijskoga rješenja te su kao takve valjan kriterij vrednovanja u konceptualnoj fazi razvoja tehničkih sustava.</p>
<b>Kriterij ekološke prihvatljivosti sekundarnih efekata na okoliš</b>	<p>Kriterij se temelji na kategorijama strategija gospodarenja otpadom [315]. Definirana je stupnjevita podjela obilježja sekundarnih efekata na okoliš prema literaturi [74], [75] i [76].</p>

<sup>1</sup> Svaka pretvorba energije iz jednog oblika u drugi povezuje se s gubitcima energije [312]. Radi lakšeg razumijevanja pojmova kvaliteta energije i energetska efikasnost u nastavku je dano objašnjenje tih dvaju pojmova. Iako se smatra da energetska efikasnost pretvorbe električne u toplinsku energiju iznosi ~100 % [312], ta efikasnost pretvorbe oblika energije ne uzima u obzir 'rad okoliša' potreban za pretvorbu. Cullen i Allwood [371] objašnjavaju da energetska efikasnost računana na konvencionalni način (uzimajući u obzir samo prvi stavak termodinamike) ne uzima u obzir kvalitetu energije. Ohta [311] definira kvalitetu oblika energije prema tome koliko je taj oblik energije dostupan u prirodi. Odum [70], [243] te Brown i Ulgiati [308] definiraju kvalitetu oblika energije prema broju jedinica solarne energije potrebne za obavljanje rada u iznosu 1 džula drugog oblika energije. Naime, kvaliteta oblika energije poput mehaničke energije i električne energije veća je primjerice od kvalitete toplinske energije. To je vidljivo i u tablici faktora solarne transformabilnosti (tablica 4.4.).

**Tablica 6.2.** Vrednovanje elemenata predložene metode [83] – 2. dio

Elementi metode	Obrazloženje
<b>Kriterij broja sekundarnih efekata na okoliš</b>	Kriterij vrednovanja ekološke prihvatljivosti koncepata proizvoda daje informaciju o broju sekundarnih efekata na okoliš. Koncept može biti visoko rangiran s obzirom na kriterij ekološke prihvatljivosti sekundarnih efekata na okoliš, no, ako je riječ o velikome broju (različitih) latentnih efekata na okoliš, ukupna ocjena ekološke prihvatljivosti mora biti uvjetovana i ovim kriterijem vrednovanja.
<b>Kriterij broja promjena agregatnoga stanja materijala</b>	Kriterij inspiriran prijedlogom Pahla i drugih [72] o povezanosti broja promjena agregatnoga stanja materijala u tehničkom procesu i troškova proizvoda.
<b>Tehnika agregiranja ocjena dobrote koncepta</b>	Tehnika agregiranja odnosi se na način određivanja skupne ocjene dobrote koncepta na temelju bodovanja prema kriterijima vrednovanja ekološke prihvatljivosti koncepata proizvoda. Funkcija agregiranja determinira način okrupnjavanja parcijalnih ocjena atributa alternative prema pojedinim kriterijima vrednovanja u skupnu vrijednost dobrote koncepta [90].  Ako je značajka koncepta vrednovana kvalitativno, riječ je o dobroti značajke koncepta. Za svaki kriterij ekološke prihvatljivosti definirane su funkcije dobrote rješenja. Zbog toga što kriteriji nisu istih dimenzija, odabrana tehnika agregiranja jest suma rangova [90].

Provjera unutarnje konzistentnosti [77] predložene metode pokazana je na primjeru koncepata pranja rublja, kada je ispitano mijenja li se rangiranje ekološki prihvatljivijih koncepata ako je jedna od neoptimalnih alternativa zamijenjena ekološki najmanje prihvatljivom alternativom [327]. Koncept pranja rublja peletima suhog leda zamijenjen je konceptom pranja ukapljenim ugljikovim dioksidom. Rangiranje ekološki prihvatljivijih koncepata nije se promijenilo, što potvrđuje valjanost tehnike sume rangova.

## 2. Provjera informacijskog tijeka metode

Validacija unutarnje konzistentnosti [77] predložene metode, tj. elemenata metode (integriranih zajedno) demonstrira se prikazom informacija i podataka te provjerom ispravnosti pretpostavki.

Vrednovanje predloženom metodom temelji se na vrednovanju prema pet kriterija ekološke prihvatljivosti što je čini više-kriterijskom metodom. Predložena je metoda relativna metoda vrednovanja i kvalitativno-kvantitativna metoda vrednovanja ekološke prihvatljivosti u konceptualnoj fazi razvoja tehničkih sustava. Tehnika agregiranja ocjena vrednovanja prema kriterijima vrednovanja predložene metode jest suma rangova [90].

Predložena je metoda:

- višekriterijska
- kvalitativna (ordinarna)
- relativna
- konjunktivna
- služi odabiru i eliminaciji koncepata.

*Predložena je metoda višekriterijska.* Pri vrednovanju koncepata često se mora uzeti u obzir više kriterija vrednovanja, kao što je i u slučaju vrednovanja ekološke prihvatljivosti. Kod višekriterijskog problema vrednovanja može postojati tzv. hijerarhija kriterija vrednovanja. U tom slučaju težinski faktori trebaju biti definirani jer opisuju relativnu važnost kriterija. Metodom vrednovanja ekološke prihvatljivosti razvijene u okviru ovog istraživanja nije propisana hijerarhija kriterija ekološke prihvatljivosti. Koncept koji je optimalan ima dobar učinak prema svim kriterijima ekološke prihvatljivosti. S druge strane, ekološki neprihvatljivi koncepti rangirani su nisko.

*Predložena metoda je ordinarna.* To znači da rangiranje ovom metodom upućuje na kvalitativni rang dobrote pojedinog koncepta iz skupa vrednovanih koncepata. Rezultati ne pokazuju koliko je određeni koncept proizvoda glede ekološke prihvatljivosti povoljniji ili nepovoljniji od drugog koncepta. Rezultati vrednovanja predloženom metodom prema svakom od kriterija ekološke prihvatljivosti zapisuju se u matrici odlučivanja, što omogućuje detaljniji pregled dobrote koncepta prema svakom od kriterija ekološke prihvatljivosti. Kvalitativno vrednovanje ekološke prihvatljivosti primjerenije je konceptualnoj fazi od kvantitativnoga vrednovanja metodama procjene životnog ciklusa zbog toga što su informacije o proizvodu (njegovu konceptu) u konceptualnoj fazi uglavnom kvalitativne.

*Predložena je metoda relativna.* Time rezultati vrednovanja i rangiranja ovise o promjeni skupa koncepata. Metode vrednovanja razlikuju se po tome podržava li metoda vrednovanje samo određenog skupa koncepata (relativno vrednovanje obzirom na određeni skup koncepata) ili su rezultati vrednovanja neovisni o promjeni skupa koncepata (apsolutno vrednovanje neovisno o skupu koncepata koji se vrednuju). Apsolutne metode vrednovanja ovise samo o kriterijima vrednovanja, rezultiraju identičnim vrijednostima i dobroti koncepata neovisno o drugim konceptima u skupu koncepata koji se vrednuju. Kod relativnih metoda vrednovanja rezultati vrijede samo za određeni skup koncepata koji se vrednuje, a promjena



skupa koncepata determinira i vrijednosti generirane za svaki pojedini skup koncepata kao što je slučaj kod predložene metode. To je stoga što primjena ove metode rezultira rangiranjem koncepata iz skupa koncepata koji se vrednuje, od ekološki najprihvatljivijeg do ekološki najmanje prihvatljivog koncepta.

*Predložena je metoda konjunktivna.* Funkcija agregiranja kriterija ekološke prihvatljivosti jest konjunktivna [292], a to znači da pozitivno vrednovanje prema jednom kriteriju može nadoknaditi negativno vrednovanje prema drugom kriteriju. Rješenja pobjednici jesu koncepti s najviše pozitivno vrednovanih značajki, a slijede ih koncepti s ravnomjerno raspoređenim brojem pozitivno i negativno vrednovanih značajki konceptijskoga rješenja [90].

*Predložena metoda rezultira rangiranjem koncepata prema ekološkoj prihvatljivosti.* Kako bi se postiglo smanjivanje skupa koncepata i razlikovanje dobrih od loših rješenja u skupu, moguće je koristiti se dvjema različitim strategijama: odabirom rješenja (odabir najboljih rješenja iz skupa mogućih rješenja) ili eliminacijom rješenja (otkrivanje loših ili neprihvatljivih rješenja iz skupa mogućih rješenja). Potonje zahtijeva manje informacija o konceptima, no ta strategija ne jamči da su preostala rješenja iz skupa mogućih rješenja ekološki prihvatljiva [72]. Studija slučaja, LCA analiza i rezultati vrednovanja ekološke prihvatljivosti koncepata pranja rublja predloženom metodom pokazali su da je u slučaju vrednovanja ekološke prihvatljivosti koncepata važnije eliminirati ekološki neprihvatljive koncepte, nego identificirati koncept koji će biti odabran za daljnju razradu. Izbor ekološki neprihvatljivog koncepta teško se može ispraviti u kasnijim fazama konstruiranja.

Ulazni podaci metode generiraju se tijekom aktivnosti *Analiza koncepata* (slika 6.1.). Analizu koncepata čine aktivnosti kao što su: analiza fizikalnih efekata, generiranje lanaca fizikalnih efekata i identifikacija sekundarnih efekata na okoliš. Vrednovanje prema predloženim kriterijima vrednovanja ekološke prihvatljivosti primjenjivo je u konceptualnoj fazi razvoja tehničkih sustava jer se vrednovanje temelji na analizi fizikalnih efekata i sekundarnih efekata na okoliš razmatranih koncepata. Fizikalni efekti i sekundarni efekti na okoliš (Chakrabarti i Johnson [317] ih nazivaju latentnim fizikalnim efektima) značajke su koncepta te ih konstruktori uzimaju u obzir tijekom analize koncepata.

Broj i vrsta kriterija ekološke prihvatljivosti ključni su za efikasno vrednovanje metodom zbog sinergijskog učinka. Istodobnom primjenom pet kriterija ekološke prihvatljivosti u obliku zasebne metode vrednovanja postiže se svrsishodnost metode vrednovanja ekološke prihvatljivosti za konceptualnu fazu. Sinergijom kriterija ekološke

prihvatljivosti i tehnike agregiranja kriterija postiže se bolja učinkovitost kriterija nego što bi to bilo moguće postići vrednovanjem prema svakom kriteriju zasebno.



**Slika 6.1.** Prikaz vrednovanja ekološke prihvatljivosti koncepata predloženom metodom

### 3. Upotreba primjera

Validacija predložene metode propisuje primjenu metode na primjerima [77]. Postupak validacije kriterija ekološke prihvatljivosti i predložene metode razvijenih u sklopu provedenog istraživanja specifičan je iz dvaju razloga:

*a) predložena metoda namijenjena je vrednovanju ekološke prihvatljivosti*

Predloženi kriteriji i metoda namijenjeni su vrednovanju ekološke prihvatljivosti u konceptualnoj fazi razvoja tehničkih sustava.

Kvantitativne metode smatraju se pouzdanijim metodama vrednovanja ekološke prihvatljivosti jer propisuju da se analize tehničkih sustava provode sustavno, uzimaju u

obzir kvantitativne podatke i manje su podložne utjecaju subjektivnih mišljenja onih koji se njima koriste [36], [315]. Pregledom literature ustanovljeno je da je ekološku prihvatljivost moguće vrednovati na osnovu kvantitativne procjene utjecaja na okoliš tek nakon konstrukcijske razrade [372].

Stoga su kvalitativne metode vrednovanja ekološke prihvatljivosti primjerenije konceptualnoj fazi razvoja tehničkih sustava, ali se smatraju subjektivnima. Razlog je tomu to što u konceptualnoj fazi uobičajeno nema dostatan broj informacija, niti je dovoljno pouzdanih informacija o proizvodu koji se razvija [7] pa su konstruktori primorani oslanjati se na informacije koje su im dostupne te na vlastito znanje i iskustvo.

*b) predložena metoda namijenjena je vrednovanju u konceptualnoj fazi razvoja tehničkih sustava*

Druga specifičnost postupka validacije jest u tome što su kriteriji i predložena metoda namijenjeni konceptualnoj fazi razvoja tehničkih sustava.

U konceptualnoj fazi rješenje i proizvod općenito su opisani te je malo informacija na temelju kojih bi se dobila preciznija slika budućega životnog ciklusa proizvoda i utjecaja na okoliš. Nadalje, u konceptualnoj se fazi iz skupa mogućih rješenja odabire najbolji koncept, i to ne samo na osnovi jednog, nego više različitih kriterija vrednovanja koncepata. Najbolji koncept ne mora nužno biti ocijenjen najvišom ocjenom ekološke prihvatljivosti, ali mora zadovoljavati kriterije vrednovanja koje su konstruktori odredili prioriternima.

Poželjno obilježje konceptijskih rješenja koje će se vrednovati tijekom validacije predloženih kriterija i metode jest da se koncepti međusobno razlikuju u radnim principima. Time se želi ispitati može li se metoda može primjenjivati za koncepte koji su inovativni te za koncepte koji nisu nužno na istom stupnju konstrukcijske razrade.

Odlukom o konceptu uobičajeno se odabire jedan koncept za daljnju razradu, što će rezultirati gotovim modelom proizvoda. Ostali koncepti iz skupa razmatranih koncepata ne razmatraju se dalje te se, u pravilu, ne provode daljnje analize koncepata koji su ocijenjeni suboptimalnima. To mogu biti oni koncepti koji ne zadovoljavaju zahtjeve korisnika ili neke od drugih važnih kriterija vrednovanja koncepata (definiranih prije tijekom razvoja).

Koncepti tehničkih sustava u konceptualnoj fazi razvoja nisu još komercijalni proizvodi te je stoga njihovu kvalitetu moguće ocijeniti samo na osnovi procjene konstruktora, a ne na temelju ekonomskih pokazatelja uspješnosti, kao što je to moguće provjeriti za proizvode koji su već komercijalno dostupni na tržištu.

Zbog navedenih specifičnosti istraživanja glede zahtjeva za validacijom metode vrednovanja ekološke prihvatljivosti koja je također namijenjena konceptualnoj fazi, bilo je nužno osmisлити primjere koncepata na kojima će biti moguće primijeniti kvalitativne i kvantitativne metode vrednovanja ekološke prihvatljivosti. Vrednovanje ekološke prihvatljivosti predloženom metodom provedeno je na dvama skupovima primjera: konceptima pranja rublja i konceptima stolnog sata budilice.

### *A) Koncepti pranja rublja*

Kvalitativno vrednovanje ekološke prihvatljivosti koncepata pranja rublja provedeno je u studiji ([63], [81]). Ispitanici u istraživanju služili su se kvalitativnim kriterijima ekološke prihvatljivosti kako bi rangirali koncepte prema ekološkoj prihvatljivosti.

Procjena životnog ciklusa (*LCA*) koncepata pranja rublja provedena je radi potvrde valjanosti odabranih koncepata za provjeru vanjske relevantnosti predložene metode.

Tržište kućanskih električnih perilica rublja uređeno je Uredbom Komisije Europske unije [365]. Uredbom se utvrđuju zahtjevi za ekološki dizajn kućanskih perilica rublja, kao i onih koje su prodane za uporabu izvan kućanstava. Uredbom je propisano da proizvođači moraju deklarirati tehničke i izvedbene karakteristike perilica rublja na tržištu (npr. kapacitet, potrošnja energije, vode i buka). Zbog prognoza o potrebi smanjivanja potrošnje vode u kućanstvima, ali i ostalih, za ekološku prihvatljivost važnih pokazatelja, postoji potreba za razvojem ekološki prihvatljivih proizvoda i proizvoda koji implementiraju inovativne tehnologije pranja i čišćenja rublja. Vrednovanje ekološke prihvatljivosti takvih koncepata zahtijeva dugotrajne i skupe analize.

Među primjerima u ovome doktorskom radu, koncepti pranja polimernim kuglicama, ultrazvučnoga pranja, pranja ukapljenim ugljikovim dioksidom i čišćenja peletima suhog leda inovativni zbog radnih principa odstranjivanja nečistoća s rublja te time valjani kandidati za provjeru predložene metode. Na temelju analize koncepata pranja rublja ustanovljeno jest da je skup razmatranih koncepata odgovarajući glede toga što sadrži koncepte koji su varijantna

rješenja sličnih koncepata proizvoda (koncepti pranja rublja A i B), ali i originalne (inovativne) koncepte (koncepti pranja rublja C, D i E).

#### B) Koncepti stolnog sata budilice

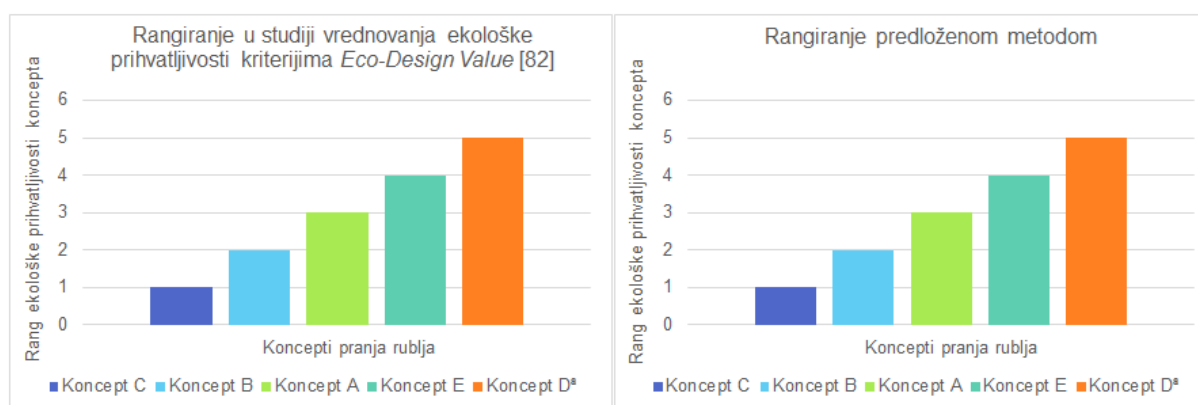
Provjera predložene metode upotrebom primjera također je provedena za skup triju koncepata stolnog sata budilice. Koncepti stolnog sata budilice opisani su u radu Bernsteina i drugih [50]. Učinkovitost metoda *LCA*, *LiDS-Wheel* [147] i *Function Impact Matrix* [52] u svrhu odabira koncepta za rekonstrukciju i razvoj ekološki prihvatljivog koncepta opisana je u studiji Bernsteina i drugih [50].

Metoda i postupak vrednovanja validirani su na dvama primjerima vrednovanja ekološke prihvatljivosti: vrednovanjem šest koncepata procesa pranja rublja i triju koncepata stolnog sata budilice. Nakon primjene predložene metode indikativno je da je predložena metoda valjana potpora vrednovanju u konceptualnoj fazi razvoja tehničkih sustava. Primjena metode na primjerima potvrđuje da predložena metoda ispunjava namijenjenu svrhu u okviru unutarnje konzistentnosti.

Validaciju vanjske relevantnosti predložene metode čine sljedeća tri koraka.

#### 4. Potvrđivanje korisnosti metode upotrebom primjera

Svrha je ovoga koraka validacije potvrđivanje koliko pojedini elementi metode i predložena metoda u cjelini zadovoljavaju namijenjenu svrhu glede vanjske relevantnosti. Na temelju rezultata primjene predložene metode na skupu koncepata pranja rublja može se zaključiti da metoda zadovoljava namijenjenu svrhu.



**Slika 6.2.** Usporedba rangiranja koncepata pranja rublja u studiji vrednovanja ([63], [81]) i predloženom metodom

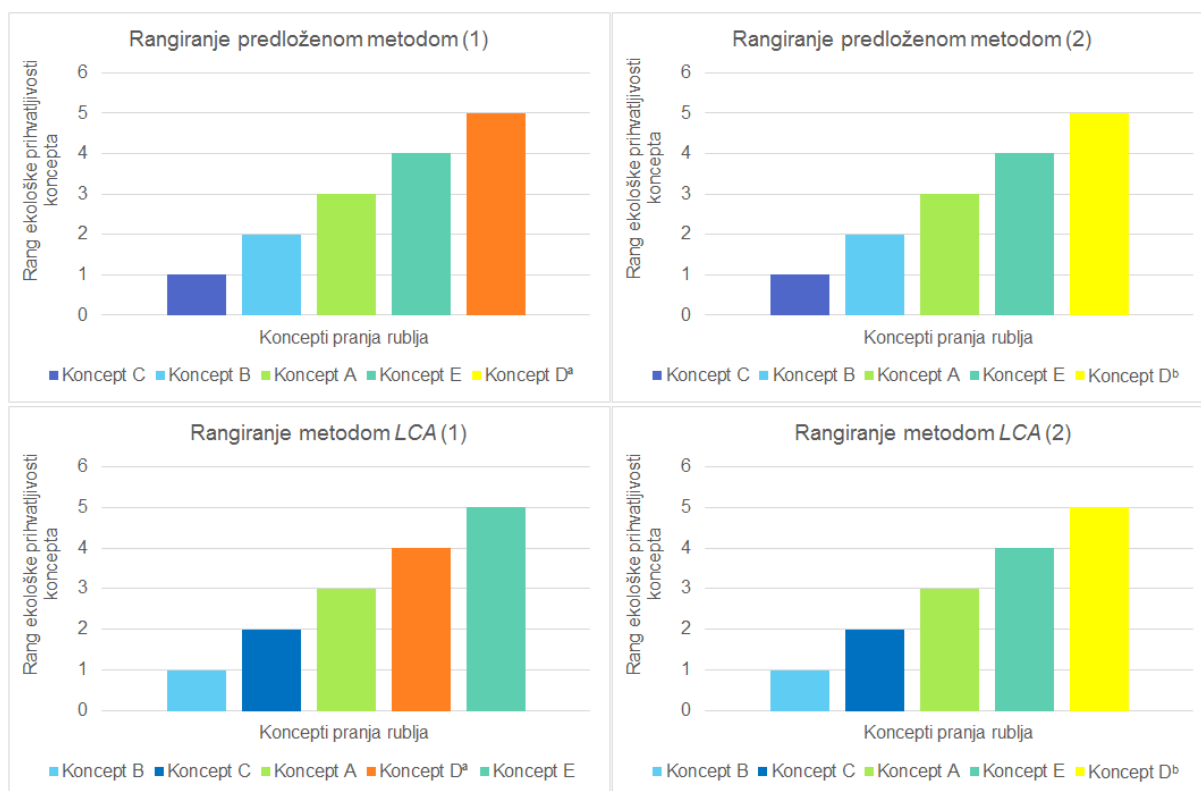
Slika 6.2. prikazuje usporedbu rangiranja koncepata pranja rublja *Eco-Design Value* [82] kriterijima i rangiranja predloženom metodom. Rangiranje kriterijima *Eco-Design Value* [82] proveli su ispitanici u studiji vrednovanja ekološke prihvatljivosti ([63], [81]).

Koncept C ocijenjen je ekološki najprihvatljivijim u usporedbi s ostalim konceptima u skupu vrednovanih koncepata (koncepti pranja rublja A, B, C, D<sup>a</sup> i E). Vrednovanje ekološke prihvatljivosti u studiji ([63], [81]), rezultati vrednovanja predloženom metodom (tablica 4.15., tablica 4.17.) i procjena životnog ciklusa koncepata (slika 5.20.) upućuju na to, da su koncepti pranja rublja B i C među ekološki najprihvatljivijim konceptima u skupu.

Prema rezultatima *LCA* koncepata (slika 5.20.), koncept B ekološki je prihvatljiviji od koncepta C, dok je koncept D<sup>a</sup> ekološki prihvatljiviji od koncepta E. Razlike u rezultatima rangiranja moguće je objasniti razlikama između kvalitativnog i kvantitativnog vrednovanja ekološke prihvatljivosti (slika 6.3.).

Prema mišljenju ispitanika u studiji, koncepti pranja rublja C i D<sup>a</sup> nisu bili dostatno opisani glede značajki, funkcija i obilježja koncepata. Ispitanici nisu zabilježili pretpostavke o konceptima koje su donijeli tijekom vrednovanja koncepata. Predložena metoda zahtijeva da se pretpostavke o konceptima eksplicitno izraze tijekom generiranja lanaca efekata i sekundarnih efekata na okoliš. Primjer je koncept pranja rublja C. Lanci efekata koncepta C (slika 4.13.) generirani su za poluautomatski uređaj kod kojega čovjek izvodi pozicioniranje za prihvrat rublja, a uređaj dalje obavlja transport i pranje rublja.

Rezultati *LCA* skupa koncepata A, B, C, D<sup>a</sup> i E (1) upućuju na zamjenu ranga koncepta E i koncepta D<sup>a</sup> (slika 6.3.: lijevo). *LCA* koncepta pranja rublja E otkriva da 75 % svih utjecaja na okoliš u životnom ciklusu koncepta uzrokuju polimerne kuglice (slika 5.18.). Razlike u rangiranju predloženom metodom i rangiranju metodom *LCA* mogu se objasniti time što su uspoređeni rezultati vrednovanja kvalitativnom i kvantitativnom metodom. *LCA* metoda uzima u obzir kvantitativne podatke o konceptima i životni ciklus koncepata, dok kvalitativne metode kao što je predložena metoda ne uzimaju u obzir kvantitativne podatke o konceptima.



**Slika 6.3.** Rangiranje koncepata pranja rublja predloženom metodom i metodom LCA; lijevo: skup koncepata A, B, C, D<sup>a</sup> i E (1), desno: skup koncepata A, B, C, D<sup>b</sup> i E (2)

Vrednovanje mehaničkog, mehaničko-digitalnog i digitalnog sata budilice predloženom metodom upućuje na to da je koncept mehaničkog sata budilice ekološki prihvatljiviji od ostalih dvaju koncepata u vrednovanom skupu koncepata. U istraživanju koje su proveli Bernstein i drugi [50] konstruktori su odabrali koncept mehaničkog sata budilice za rekonstrukciju i predlaganje novih rješenja, unatoč tomu što vrednovanje na temelju LCA metode upućuje na to da je koncept digitalnog sata budilice ekološki prihvatljiviji.

### 5. Potvrđivanje korisnosti primjene metode

Provjera korisnosti primjene predložene metode temelji se na analizi studije u kojoj su ispitanici imali zadatak rangirati koncepte pranja rublja prema ekološkoj prihvatljivosti ([63], [81]). Iako su ispitanici vrednovali istih pet koncepata, zabilježene su razlike u dodijeljenim ocjenama na razini pojedinačnih *Eco-Design Value* [82] kriterija. Rezultati vrednovanja kriterijima *Eco-Design Value* [82] upućuju na to da su neki od kriterija ekološke prihvatljivosti ispitanicima bili nerazumljivi ili im nisu bili otprije poznati.

Nikander i drugi [372] proučavaju utjecaj eksplicitno propisanih i implicitno definiranih kriterija vrednovanja koncepata. Kada kriteriji nisu eksplicitno definirani, sudionici u

eksperimentalnoj studiji [372] odstupali su od prethodno definiranih kriterija i nekonzistentno vrednovali koncepte oslanjajući se na *intuiciju* ([7], [11]). S obzirom na to da rezultati vrednovanja ekološke prihvatljivosti koncepata pranja rublja u studiji [81] također upućuju na nekonzistentnost vrednovanja kada kriteriji nisu bili propisani, predloženi su kriteriji ekološke prihvatljivosti eksplicitni i kao takvi implementirani u predloženu metodu.

Sljedivost zaključaka o rangiranju koncepata prema ekološkoj prihvatljivosti ostvarena je na sljedeći način. Budući da predložena metoda omogućuje vrednovanje prema svakom od ukupno pet kriterija ekološke prihvatljivosti i pregled dodijeljenih vrijednosti, korisnik metode ima uvid u korake vrednovanja. U matrici odlučivanja omogućen je uvid u dobrotu koncepata prema svakom od kriterija vrednovanja ekološke prihvatljivosti koncepta. Time se omogućuje usporedba radnih principa i sekundarnih efekata na okoliš koncepata. Metode *LCA* [1], *Function Impact Matrix* [52], *LiDS-Wheel* [147], *Eco-Design Value* [82] i smjernice *Design for Environment* [170] ne omogućuju takvu usporedbu.

Vrednovanje prema kriterijima ekološke prihvatljivosti predloženom metodom može se provesti na temelju informacija o konceptima koje su dostupne u konceptualnoj fazi. Funkcijska struktura, analiza tjekova energije, materijala i signala te analiza fizikalnih efekata i sekundarnih efekata na okoliš preduvjeti su za primjenu predložene metode. Analiza fizikalnih efekata i okvirno razmatranje sekundarnih efekata na okoliš uobičajeno se provode u konceptualnoj fazi razvoja tehničkih sustava, zbog čega nema prepreka provedbi detaljnije analize koncepata originalnog dizajna.

### 6. Razmatranje korisnosti metode u širem kontekstu

Iako je preporuka da se radi potvrđivanja korisnosti metode u širem kontekstu provede empirijsko istraživanje, implementacija metoda u razvojnim poduzećima dugotrajan je proces koji nije bilo moguće provesti u okvirima obavljenog istraživanja. Predložena je metoda namijenjena vrednovanju novih konceptijskih rješenja čiji je razvoj zahtjevniji od razvoja tehničkih sustava koji su inkrementalni ili adaptivni dizajn.

Suvremena razvojna poduzeća orijentiraju se na razvoj sociotehničkih sustava koji su kompleksni tehnički sustavi i sustavi proizvoda i usluga. Zbog toga nije bilo moguće provesti validaciju metode koja je namijenjena isključivo tehničkim sustavima. Nadalje, ekološka je prihvatljivost samo jedan od brojnih kriterija vrednovanja, a po važnosti se ne smatra jednim od prioritetnijih za uspješnost poslovanja.



Iako su istraživači ([35], [50], [53], [199], [315]) proučavali povezanost ekološke prihvatljivosti (utjecaja na okoliš) i funkcija proizvoda, nisu uspjeli dovesti u vezu ekološku prihvatljivost s vrstom pretvorbi energije, materijala i signala, fizikalnim efektima i sekundarnim (latentnim) efektima na okoliš.

Funkcije proizvoda opisuju proizvod na način da su poveznica između ciljeva (zadaca) koje proizvod ima ostvariti (tj. koje fizikalne efekte isporučiti) i strukture proizvoda [374]. Devanathan i drugi [52] demonstrirali su da je razmatranje funkcija proizvoda ključno u procesu donošenja odluka. Kada im nisu bili dostupni podaci o utjecajima na okoliš, a pri izostanku ostalih, za vrednovanje ekološke prihvatljivosti važnih podataka o proizvodu konstruktori su donosili prosudbe i odluke na temelju prijašnjih iskustva, nastojeći zadovoljiti zahtjeve ekološke prihvatljivosti.

Rezultati koji su dobiveni predloženom metodom korisni su s obzirom na svrhu metode, što je moguće demonstrirati preko pokazatelja učinkovitosti metoda kao što su kvaliteta rezultata, optimalni troškovi ili smanjenje troškova implementacije, odnosno troškova zbog primjene metode te optimalno vrijeme ili smanjivanje vremena potrebnog za obavljanje aktivnosti vrednovanja i odlučivanja o ekološkoj prihvatljivosti koncepata drugom ili referentnom metodom. Tablica 6.3. prikazuje vrednovanje kvalitete odlučivanja na osnovi pokazatelja kvalitete odlučivanja [293].

**Tablica 6.3.** *Provjera vanjske relevantnosti predložene metode na temelju kvalitete odlučivanja*

Br.	Pokazatelji kvalitete odlučivanja [293]	Vrednovanje
1.	Izbor najprihvatljivije opcije (ekološki najprihvatljivije)	■ ■
2.	Prikupljanje informacija i istraživanje skupa mogućih rješenja	■ ■ ■
3.	Identificiranje kritičnih parametara i obilježja vrednovanih rješenja	■
4.	Validacija (potvrda) odabiru rješenja i eliminaciji drugih rješenja	■ ■ ■
5.	Potvrda donesenih odluka i konačne odluke u cilju odlučivanja	■ ■

Stupanj zadovoljenja kvalitete odlučivanja: ■ - nizak, ■ ■ - srednji, ■ ■ ■ - visok.

Rezultati vrednovanja ekološke prihvatljivosti koncepata pranja rublja semikvantitativnom metodom temeljenom na smjernicama *Eco-Design Value* [82], *LCA* metodom i predloženom metodom upućuju na konzistentno razlikovanje ekološki prihvatljivih od ekološki neprihvatljivih koncepata.

Rodriguez Moreno i drugi [375] analizirali su vrijeme potrebno za analizu funkcija proizvoda za potrebe funkcijske dekompozicije i procjene životnog ciklusa proizvoda.

Prosječno je trajanje procesa analize funkcija proizvoda nekoliko dana, dok primjena metode procjene životnog ciklusa proizvoda zahtijeva nekoliko mjeseci. Analiza funkcija proizvoda, tječna energije, materijala i signala te sekundarnih efekata na okoliš nužni su preduvjet za primjenu metode vrednovanja ekološke prihvatljivosti, te stoga određuju razinu znanja potrebnu za primjenu metode i vrijeme potrebno za njezinu primjenu.

Učinkovitost predložene metode prema pokazatelju vremena potrebnog za primjenu metode i generiranje rezultata slična je učinkovitosti ostalih metoda vrednovanja namijenjenih konceptualnoj fazi. Vrijeme potrebno za primjenu metode (npr. *LiDS-Wheel* [147] ili [61]) znatno ovisi o količini iskustva rada s metodom i je li prethodno provedena detaljna analiza konceptijskih rješenja. Prema pokazatelju znanja potrebnog za primjenu metode, predložena metoda zahtijeva ekspertno znanje korisnika (o konceptima, radnim principima, načinu generiranja lanaca fizikalnih efekata, sekundarnim efektima na okoliš, dodjeljivanju faktora transformabilnosti itd.).

Vrednovanje prema predloženim kriterijima ekološke prihvatljivosti ne zahtijeva dodatne troškove prikupljanja informacija ili računalom podržanog softvera. Za vrednovanje prema kriteriju ekološke prihvatljivosti ekoefektivnost pretvorbe energije i signala potrebno je vrednovanje provesti prema tablici 4.6., a za vrednovanje prema kriteriju ekološke prihvatljivosti sekundarnih efekata na okoliš prema tablici 4.8.

Procijenjeno prosječno vrijeme za primjenu metode stoga iznosi od nekoliko dana za koncepte sa zadovoljavajućom razinom razrade (poznati radni principi, lanci efekata i sekundarni efekti na okoliš) do nekoliko tjedana za koncepte kod kojih je potrebno provesti dodatno prikupljanje podataka, analizu konkurentskih proizvoda i proučavanje tehnologije i tehničkih procesa koncepata.

U radu Bernsteina i drugih [50] konstruktori su trebali provesti rekonstrukciju stolnog sata budilice. U studiji redom su trebali to učiniti: 1) bez pomoći ikakvih ekodizajnerskih alata, 2) koristeći se metodom *LiDS-Wheel* [147] i listom kriterija ekološke prihvatljivosti, 3) s pomoću podataka iz procjene utjecaja na okoliš (*LCA*) i 4) koristeći se metodom *Function Impact Matrix* [52]. Preko upitnika koji su ispunili konstruktori koji su sudjelovali u studiji, Bernstein i drugi [50] zaključili su da su ispitanici najvišim ocjenama ocijenili *FIM* metodu [52] u usporedbi sa ostalim načinima provođenja rekonstrukcije i traženja optimalnih rješenja. Kriteriji vrednovanja metoda prema kojima su ispitanici studije ocijenili ponuđene im metode za potporu rekonstrukciji jesu: jednostavnost metode, kvaliteta podataka, mogućnost identificiranja rješenja za rekonstrukciju i ukupna efektivnost metode.

U studiji Bernsteina i drugih [50] konstruktori su za generiranje ekološki prihvatljivih koncepata odabrali kombinaciju metoda *LiDS-Wheel* [147] i *FIM* [52]. Kad su se koristili samo podacima o utjecajima na okoliš koncepata kako bi rekonstruirali stolni sat budilicu, generiranje ekološki prihvatljivijeg koncepta bilo je otežano. Razlog tomu je način prikazivanja podataka o utjecajima na okoliš. Naime, veze između pojedinih komponenata proizvoda i utjecaja na okoliš nisu neovisne o funkcijama koje ostvaruju. Tako primjerice zamjena mehaničkih komponenata elektroničkim zahtijeva uvođenje novih elektroničkih komponenata, što znači dodavanje novih funkcija proizvodu. Time nastaju novi ili konstruktorima još nepoznati utjecaji na okoliš. Konstruktori su zapazili da zamjena komponenata takvog tipa (uvođenje novih parcijalnih funkcija) zahtijeva kompromise koje bi trebalo napraviti za potrebe rekonstrukcije.

Zbog povećanja podataka uzrokovana dodavanjem novih komponenata, konstruktori nisu mogli generirati novi koncept proizvoda na zadovoljavajući način. Konstruktori su stoga zaključili da je rekonstrukcija proizvoda isključivo na temelju *LCA* analize proizvoda manje efektivna potpora za rekonstrukciju proizvoda u usporedbi s drugim metodama koje su im bile ponuđene [50].

*FIM* metoda [50] pokazala se učinkovita za rekonstrukciju i predlaganje novih rješenja za rekonstrukciju jer omogućuje vrednovanje glavnih i sporednih funkcija proizvoda. No, ograničenje *FIM* metode [52] jest u tome što je za njezinu primjenu nužna procjena utjecaja na okoliš koncepata koji se vrednuju, dok za primjenu predložene metode *LCA* analiza nije nužna.

### **6.3. Rasprava o ograničenjima predložene metode**

Vrednovanje prema kriterijima definiranim u sklopu prikazanog istraživanja pretpostavlja analizu pretvorbi energije, materijala i signala, identificiranje sekundarnih efekata na okoliš koncepata te dodjeljivanje ocjena ekološke prihvatljivosti sekundarnim efektima na okoliš. Primjenom predložene metode na primjerima ustanovljena su i ograničenja metode.

U konceptualnoj fazi konstruktori se suočavaju s problemom nedostatka informacija o razmatranim konceptima. Budući da u razvoju proizvoda ne postoji propisana detaljnost i razina razrade koncepata, konstruktori se često moraju dodatno upoznati s konceptima i radnim principima koncepata koje vrednuju. Prikupljanje informacija o konceptima provodi se analizom tržišta, konkurencije, zahtjeva korisnika, analizom već postojećih proizvoda na

tržištu (referentnih proizvoda) te patenata. Nabrojene aktivnosti i pristup resursima mogu generirati dodatne troškove za poduzeće.

Predložena metoda zahtjeva dodatnu analizu koncepata, te upoznavanje konstruktora s metodama i tehnikama generiranja lanaca fizikalnih efekata. Srinivasan i drugi [376] primijetili su da je definiranje fizikalnih efekata i lanaca efekata zadatak koji je za konstruktore izazov ako nemaju iskustva s takvom analizom koncepata proizvoda. Predložena metoda zahtijeva analizu fizikalnih efekata i definiranje lanaca efekata do razine detaljnosti, gdje su definirane transformacije energije, materijala i signala, a koje podrazumijevaju promjene oblika energije i signala te promjene agregatnoga stanja materijala.

Konstruktori često nisu dovoljno dobro upoznati s načinom generiranja lanaca fizikalnih efekata, s tim kako identificirati fizikalne efekte ili kako ih odabrati iz kataloga te su im stoga potrebni dodatna poduka i pristup literaturi. Konstruktori mogu učiti iz postojećih primjera te s pomoću objavljenih kataloga efekata [298], [314] ili tražilica efekata dostupnih na internetu. Nabrojene aktivnosti i resursi mogu generirati dodatne troškove za poduzeće.

Tijekom primjene predložene metode konstruktori također definiraju sekundarne efekte na okoliš. Postupak identifikacije sekundarnih efekata koncepata na okoliš može zahtijevati ponovno razmatranje transformacija u tehničkom procesu, analizu modela funkcija prema tijeku energije, materijala i signala, zatim radnih principa i fizikalnih efekata karakterističnih za razmatrane koncepte.

Postupak dodjeljivanja ocjena ekološke prihvatljivosti sekundarnim efektima, iako je potpomognut tablicom za dodjeljivanje dobrote, nije imun na nekonzistentno dodjeljivanje ocjena koje daju konstruktori. Primjerice, sekundarni efekt na okoliš jednog koncepta konstruktor može ocijeniti visokom ocjenom, a isti sekundarni efekt na okoliš kod drugog koncepta može ocijeniti niskom ocjenom. Vjerojatnost je nekonzistentnog vrednovanja veća što konstruktor ima vrednovati više koncepata. To je stoga što konstruktor može „zaboraviti“ zašto je određenom sekundarnom efektu na okoliš jednog koncepta dodijelio upravo određenu ocjenu, a kad se suoči s istim sekundarnim efektom na okoliš drugog koncepta, neće prepoznati da je riječ o sekundarnom efektu na okoliš iste dobrote.

Mogućnost nekonzistentnog vrednovanja sekundarnih efekata na okoliš postoji unatoč tomu što konstruktor zapisuje dodijeljene ocjene u pomoćnu tablicu svakog koncepta. Konstruktorima se preporučuje da nakon završetka dodjeljivanja ocjena konceptima koje

vrednuju i rangiraju provjere da li su konzistentno vrednovali jednake ili slične sekundarne efekte na okoliš.

Inženjeri koji sudjeluju u procesu konstruiranja i razvoja proizvoda donose odluke na temelju stečenih vještina, znanja i iskustava, ali pritom nisu nužno i objektivni. Pokatkad konstruktori ne surađuju izravno s korisnicima i kupcima, nego preko većih organizacija ili timova, što također može biti razlog tomu da konstruktori nemaju potrebne informacije o potrebama i zahtjevima korisnika. Zahtjevi i specifikacije često do tima dolaze preko odjela u poduzeću kao što su odjel prodaje ili marketinga. Najkompleksniji oblici ovih interakcija identificirani su u vanjskim lancima (mrežama) nabave u kojima surađuju stručnjaci iz različitih područja, kompetencija te kultura [92]. Proces konstruiranja je i sociotehnički proces te je stoga često uvjetovan subjektivnim preferencijama inženjera koji sudjeluju u aktivnostima vrednovanja koncepata i proizvoda.

Kod koncepata s većim brojem transformacija energije, materijala i signala pa time i većim brojem funkcija, fizikalnih efekata i sekundarnih efekata na okoliš, predložena metoda zahtjeva više vremena kako bi se došlo do konačnog rezultata koji govori o relativnom rangi koncepata u razmatranom skupu. Pomak prema razvoju efikasnije metode mogao bi se postići razvojem računalne potpore predloženoj metodi, no potrebno je dodatno istraživanje mogućnosti i dosega takve računalne potpore.

Proces odlučivanja o konceptu iz skupa koncepata za daljnju razradu temelji se na razmatranju karakteristika koncepata na temelju vrednovanja s obzirom na zahtjeve ili kriterije vrednovanja. Kriterije i relativnu važnost kriterija vrednovanja definiraju poduzeće, menadžment i razvojni tim. Riječ je o internoj odluci poduzeća. Odluka o tome koji će kriteriji biti uzeti u obzir pri odlučivanju o konceptu i kako će vrednovanje prema pojedinom kriteriju utjecati na konačnu ocjenu kvalitete koncepta specifična je za ciljano tržište, proizvod, sektor poduzeća, korisnike, potrebe korisnika i druge specifičnosti projekta i poduzeća, kao što su primjerice vizija poduzeća ili marketinška strategija proizvod te se ne mogu generalizirati i ukalupiti u metodu.

U provedenom istraživanju nije propitivana kvaliteta koncepata s obzirom na funkcionalne zahtjeve i kriterije vrednovanja koncepata, kao što su kvaliteta zadovoljenja potreba korisnika, troškovi, rizici, sukladnost s normama i legislativom, proizvodni postupci i dr. Iako je uobičajeno da se pri odlučivanju o konceptu za daljnju razradu i realizaciju u finalan proizvod koncept vrednuje prema svim, za poduzeće i proizvod relevantnim zahtjevima i kriterijima, odluka je o konceptu specifična za pojedino poduzeće i razvojni

projekt. To znači da koncept koji je ocijenjen maksimalnim ocjenama prema kriterijima ekološke prihvatljivosti ne mora nužno biti odabran za daljnji razvoj i razradu.

Iako relativna važnost kriterija ekološke prihvatljivosti s obzirom na ostale kriterije vrednovanja koncepta može biti izražena kvantitativno kako bi se realiziralo odlučivanje pri više-kriterijskom vrednovanju (npr. metodom *analitičkog hijerarhijskog procesa* – *AHP* [108]), zaključak je istraživanja da relativnu važnost kriterija vrednovanja koncepta nije uputno generalizirati. Važnosti pojedinih kriterija vrednovanja pri odlučivanju o konceptu za daljnju razradu specifične su za pojedino poduzeće, proizvod, projekt, tržišni segment i potrebe korisnika.

### **6.4. Smjernice za verifikaciju istraživanja i primjenu predložene metode u praksi**

Pri vrednovanju konceptijskih rješenja tehničkih sustava uobičajeno je uzeti u obzir kriterije vrednovanja, te ustanoviti relativnu važnost kriterija vrednovanja, primjerice na temelju važnosti zahtjeva korisnika. Odlučivanje o konceptu ili konceptima za daljnju razradu temelji se na vrednovanju prema kategorijama kriterija kao što su potrebe korisnika, troškovi, rizici, zakonske regulative i norme, estetika i dizajn, te mnoge druge kategorije. Proces definiranja kategorija kriterija vrednovanja konceptijskih rješenja specifičan je za određeno poduzeće, sektor, proizvod, tržište ili korisnike.

Vrednovanje kriterijima u svrhu odlučivanja tijekom razvoja proizvoda može se također temeljiti na analizama, procjenama i prijašnjem iskustvu konstruktora i dionika u razvojnome procesu. Primjerice, troškovi životnog ciklusa koncepta mogu se procijeniti na osnovi analize i procjene troškova životnog ciklusa nekoga prijašnjeg proizvoda ili projekta, a vrednovanje s obzirom na rizike može se temeljiti na procjeni rizika i usporedbi primjerice s prije prihvaćenim normama i standardima praćenja projekata poduzeća. Zahtjevi i informacije iz prošlih projekata poduzeća te analize proizvoda konkurencije temelj su mnogih metoda procjena rizika, troškova ili utjecaja na okoliš.

U pravilu, ne postoje znanstveno utemeljeni razlozi zbog kojih bi određeni kriteriji imali prevagu nad ostalima, te ne postoje metode kojima bi se utvrdio faktor važnosti, a time i funkcija agregiranja kvalitativnih i kvantitativnih parcijalnih ocjena radi dobivanja ukupne vrijednosti ekološke prihvatljivosti koncepta ili proizvoda. Byggeth i Hochschorner [46] smatraju da je dodjeljivanje kvantitativne vrijednosti kako bi se ocijenio proizvod prema nekom od kriterija, nužno učiniti vodeći se smjernicama ili drugim sofisticiranim metodama

za dodjeljivanje kvantitativne ocjene kvalitativnom kriteriju. Metodu za određivanje težinskih faktora važnosti kriterijima ekološke prihvatljivosti u svrhu dodjeljivanja jedinstvene ocjene ekološke prihvatljivosti rješenju proizvoda, potrebno je eksplicitno odrediti prije donošenja odluke o konceptu, no osim oslanjanja na prijašnja iskustva i prošle projekte, nema smjernica za njihovo određivanje.

Zbog ograničenja metode, predloženu je metodu uputno kombinirati s metodama kojima je moguće vrednovati koncept s obzirom na ostale, za odabir koncepta važne kriterije (npr. *QFD* [47]), s metodama koje propisuju analizu životnog ciklusa koncepta (npr. *ERPA* [20], *MET* [147], *LiDS-Wheel* [147], *MECO* [179]) ili kvantitativno vrednovanje utjecaja na okoliš (npr. *Function Impact Matrix* [52] i metode za aproksimaciju utjecaja na okoliš [18], [59], [62], [198], [201], [203], [214]).

Metoda *QFD* [47] primjer je metode koja je vrlo dobro prihvaćena u praksi te su razvijene njezine brojne inačice ([53], [188], [189], [190], [191]). Spomenuta metoda propisuje analizu zahtjeva korisnika i kriterija vrednovanja koncepata kroz sve kategorije kriterija vrednovanja (funkcionalne zahtjeve, troškove, rizike, ekološku prihvatljivost itd.) te određivanje apsolutne i relativne važnost kriterija vrednovanja. *QFD* stoga pruža odgovarajući metodološki okvir za kombiniranje predloženih kriterija ekološke prihvatljivosti i kriterija vrednovanja koncepata temeljenih na zahtjevima korisnika radi kvalitativnoga vrednovanja ekološke prihvatljivosti u konceptualnoj fazi razvoja tehničkih sustava.

Proces uvođenja i integracije metoda u razvojni proces poduzeća uobičajeno se provodi prema metodologiji. Za verifikaciju predložene metode preporučuje se pratiti metodologiju Knighta i Jenkinsa [138]. Ta je metodologija namijenjena implementaciji ekodizajnerskih metoda u poduzećima, a propisuje i vrednovanje predložene metode s obzirom na realni razvojni proces i zahtjeve menadžmenta poduzeća.

## 7. ZAKLJUČAK

*U zaključku doktorskog rada dani su objašnjenje rezultata istraživanja te rasprava o istraživanju koja uključuje obrazloženje odgovora istraživačkih pitanja. U sklopu provedenog istraživanja predloženi su kriteriji ekološke prihvatljivosti i metoda vrednovanja ekološke prihvatljivosti u konceptualnoj fazi razvoja tehničkih sustava. Objašnjena su ograničenja predložene metode i znanstveni doprinosi provedenog istraživanja. Poglavlje završava smjernicama za buduća istraživanja.*

---

### 7.1. Rasprava i rezultati istraživanja

U sklopu provedenog istraživanja predložena je nova metoda vrednovanja koja se temelji na vrednovanju prema kriterijima ekološke prihvatljivosti. Kriteriji ekološke prihvatljivosti konceptijskih rješenja jesu ekoefektivnost pretvorbi energije i signala, broj pretvorbi energije i signala, ekološka prihvatljivost sekundarnih efekata na okoliš, broj sekundarnih efekata na okoliš i broj promjena agregatnoga stanja materijala u tehničkome procesu. Vrednovanje je predloženom metodom nehijerarhijsko višekriterijsko vrednovanje i rangiranje koncepata tehnikom sume rangova.

Kriteriji ekološke prihvatljivosti i predložena metoda namijenjeni su konceptualnoj fazi razvoja tehničkih sustava. Zbog toga što se vrednovanje predloženom metodom temelji na vrednovanju značajki transformacija energije, materijala i signala u tehničkome procesu, predlaže se naziv nove metode – *Ekotransformabilnost*. Prijedlog naziva nove metode inspiriran je kriterijem ekoefektivnosti pretvorbi energije i signala koji se temelji na



razmatranju solarne transformabilnosti oblika energije [243] i vrednovanju transformacija pretvorbi energije i signala prema hijerarhiji oblika energije [70].

Istraživanjem prikazanom u ovome doktorskom radu odgovoreno je na tri istraživačka pitanja:

1. Koja su ograničenja postojećih metoda i alata vrednovanja ekološke prihvatljivosti i njihove primjene u konceptualnoj fazi razvoja tehničkih sustava?

Vrednovanje ekološke prihvatljivosti uobičajeno se provodi na temelju analize životnog ciklusa i procjene utjecaja proizvoda na okoliš [1], nakon konstrukcijske razrade [2]. Tek se konstrukcijskom razradom određuju značajke proizvoda potrebne za kvantitativno vrednovanje utjecaja proizvoda na okoliš [3], [7].

Metode i alati koji se uporabljaju za vrednovanje ekološke prihvatljivosti koncepata u konceptualnoj fazi zahtijevaju informacije o proizvodu koje su dostupne tek u fazi konstrukcijske razrade proizvoda. Te su informacije primjerice tehnološki postupci izrade, specifikacija materijala od kojih je izrađen proizvod, značajke oblika i dimenzijske značajke proizvoda [35]. Odluku o izboru ekološki neprihvatljivog konceptijskog rješenja proizvoda i rješenja koje je neprihvatljivo glede troškova nije jednostavno ispraviti u podmakloj fazi konstrukcijske razrade [14].

Konceptijska rješenja koja su razmatrana pri izboru koncepta koji će biti kandidat za daljnju konstrukcijsku razradu i razvoj uobičajeno su osmišljena na temelju iskustva, intuicije i pretpostavki konstruktora o kvaliteti, troškovima i utjecajima na okoliš. Analize obilježja i učinkovitosti konceptijskih rješenja u vezi s tim pitanjima provedene su na temelju jednostavnih metoda procjene, a zbog ograničenja nedostatka podataka o proizvodu, životnom vijeku i potrošnji materijala i energije [378]. Kao rezultat takvoga kvalitativnog opisa konceptijskih rješenja, odluka o konceptu za daljnju razradu često je slabo potkrijepljena i temelji se na pretpostavkama o konceptima, odnosno na subjektivnim doživljajima i percepciji kvalitete razmatranih koncepata. Pri razmatranju ekološke prihvatljivosti razmatranih koncepata, pristranost konstruktora može biti odlučujuća zbog ograničena iskustva i znanja koje konstruktori imaju o ekodizajnu, metodama konstruiranja za okoliš i metodama projektiranja za životni ciklus proizvoda [378].

Proces razvoja ekološki prihvatljivih proizvoda (ekodizajn) započinje generiranjem liste zahtjeva te u fazi planiranja koja prethodi konceptualnoj fazi konstruiranja [119]. Klasifikacija alata za konceptualnu fazu kod Gómez Navarro i drugih [274] uključuje: alate za

treniranje ekodizajna za konstruktore, alate za razvoj računalnog modela proizvoda u interaktivnom okruženju koji omogućuju suradnju konstruktora i ekodizajn stručnjaka, *CAD* računalne alate, ISO 14062 smjernice [98], [119] te alate za oblikovanje i konstrukcijsku razradu (smjernice za rastavljanje proizvoda, modularno oblikovanje, recikliranje, ponovnu proizvodnju, uporabu i dr.). Gómez Navarro i drugi [274] ni jedan od alata koje su analizirali nisu kategorizirali kao alat za procjenu utjecaja na okoliš za konceptualnu fazu procesa konstruiranja. Analizirane alate, Gómez Navarro i drugi [274] smatraju veoma pogodnim za provođenje rekonstrukcija proizvoda, no ne i za projekte s ambicioznijim ciljevima smanjivanja utjecaja proizvoda na okoliš putem dematerijalizacije (ostvarivanje željene funkcionalnosti proizvoda preko usluga), novih tehnologija (npr. izum tranzistora) ili uporabom obnovljivih izvora energije (npr. solarne energije) [129].

Metode kao što je *ERPA* matrica [20] nije primjenjiva za vrednovanje više koncepata proizvoda odjednom [54]. *Ecodesign PILOT* [140] također nije namijenjen za vrednovanje i usporedbu ekološke prihvatljivosti više koncepata. Matrice *ERPA* [20] i *MECO* [179] služe kao priprema za opsežniju analizu životnog ciklusa proizvoda [54]. Istraživanje Bernsteina i drugih [50] pokazalo je da vrednovanje metodom *LiDS-Wheel* [147] pokazuje slične rezultate vrednovanja za različite proizvode, odnosno da je ekološka prihvatljivost proizvoda slična.

Većina metoda vrednovanja ekološke prihvatljivosti proizvoda namijenjena je primjeni u trenutku procesa konstruiranja i razvoja u kojemu su dobro poznate ključne značajke proizvoda kao što su geometrijske značajke, materijali, tehnološki postupci proizvodnje i tolerancije. U trenutku kada su razvijena preliminarne rješenja proizvoda u fazi oblikovanja, upravo je nedostatak detaljnih specifikacija proizvoda uzrok teškoćama pri izboru i vrednovanju rješenja. Iako postoji veliki potencijal za optimizaciju preliminarne oblikovnih rješenja proizvoda u tom trenutku, nemogućnost da se varijante vrednuju uzrokuju porast troškova razvoja [379].

Odlučivanje o konceptu koji će biti izabran za daljnje unapređivanje i razradu, smatra se jednom od aktivnosti ključnih za uspješan tijek procesa razvoja. Uspjeh proizvoda na tržištu, funkcionalnost, kvaliteta i troškovi ovise o odlukama donesenima tijekom konceptualne faze: odlukama o zahtjevima, konceptu, funkcijama i specifikacijama rješenja odabranog za daljnju razradu.

U konceptualnoj fazi poželjno je generirati više koncepata jer se smatra da se time povećava vjerojatnost pronalaska najboljeg, odnosno odgovarajućeg koncepta proizvoda [109]. Što je manje izmjena u kasnijim fazama razvoja, veća je vjerojatnost uspješnog

završetka procesa razvoja [103]. Pri vrednovanju koncepata konstruktori mogu bolje razumjeti koji su koncepti bolji i zašto, čime je i veća vjerojatnost izbora potencijalno najboljih rješenja [109].

U spomenutoj je fazi potrebno generirati što više rješenja, no odmah treba izuzeti najnepovoljnija rješenja kako se resursi ne bi trošili na razvoj rješenja koja se ne mogu unaprijediti i poboljšati [72], [377]. Stoga se nakon definiranja specifikacija i funkcionalnih zahtjeva na temelju kojih se provodi vrednovanje i odabir najboljih rješenja ili generiraju novi koncepti, nastoji smanjiti broj koncepata koji se razmatraju i dalje vrednuju [7]. Specifikacije i ključne značajke proizvoda često nužno moraju biti doneseni najkasnije u konceptualnoj fazi kako bi se proces konstruiranja uspješno primaknuo prema konstrukcijskoj razradi, završnom detaljiranju i pripremi proizvodnje te zadovoljili rokovi isporuke proizvoda.

Postoji široki spektar metoda vrednovanja ekološke prihvatljivosti koncepta proizvoda [60], no one se primjenjuju kada su koncepti nastali rekonstrukcijom referentnih proizvoda s već poznatim utjecajima na okoliš, zbog čega je utjecaje na okoliš novih koncepata moguće aproksimirati. No, metode vrednovanja ekološke prihvatljivosti koje se primjenjuju u konceptualnoj fazi razvoja proizvoda pokazale su se nedovoljno efikasne i efektivne za vrednovanje i usporedbu originalnih koncepata proizvoda.

Vrednovanje ekološke prihvatljivosti valja provoditi u svim fazama razvoja, pa i u konceptualnoj fazi, a razmatranje ekološke prihvatljivosti može biti važno i za razvoj novih i inovativnih proizvoda, ali i ekoinovacija [15]. Važno je rano u procesu razvoja identificirati ekološki neprihvatljive koncepte kako bi se izuzeli iz daljnjeg razmatranja. Izbor neadekvatnog koncepta malokad se može nadomjestiti ili ispraviti u kasnijim fazama razvoja [72].

Pregledom literature zaključeno je da postoji potreba za razmatranjem ekološke prihvatljivosti proizvoda u ranim fazama razvoja, kako bi se iskoristio potencijal za rano definiranje ekološki prihvatljivih rješenja. Preduvjeti za primjenu metode procjene životnog ciklusa proizvoda ograničavajuće su glede primjene te metode u svrhu vrednovanja ekološke prihvatljivosti koncepata proizvoda.

U istraživanju Collado-Ruiz i Ostad-Ghorabi [37], kada su se konstruktori služili samo rezultatima procjene životnog ciklusa referentnih proizvoda, ideje koje su generirali odnosile su se na rekonstrukciju referentnog proizvoda. Rješenja koja su ponudili nisu bila inovativna ili novi koncepti te su Collado-Ruiz i Ostad-Ghorabi zaključili da način na koji su predloženi

informacije i rezultati procjene životnog ciklusa može utjecati na to hoće li novogenerirane ideje biti inovativne ili neće.

*LCA* je moguće primijeniti za usporedbu proizvoda samo kada je riječ o sličnim proizvodima. Tomu vodi posljedica da su proizvodi koji su poboljšani glede njihove ekološke prihvatljivosti rezultat inkrementalnog poboljšavanja i rekonstrukcije, a ne inovativni i novi proizvodi. Prema tome, *LCA* se može okarakterizirati kao metoda koja se primjenjuje retroaktivno radi provjere ekološke prihvatljivosti proizvoda u fazi konstrukcijske razrade [372].

Postavlja se pitanje kada točno u procesu konstruiranja primijeniti metodu procjene životnog ciklusa. Metode i alati koji služe kvantifikaciji utjecaja proizvoda na okoliš tijekom konceptualne faze nisu primjenjivi prije no što su definirani koncept proizvoda, funkcije, struktura proizvoda i materijali za izradu komponenata [35]. Izbor materijala za izradu komponenata veoma utječe na ekološku prihvatljivost proizvoda i utjecaje na okoliš, no također se ne smije izostaviti ni izbor tehnoloških postupaka proizvodnje [206]. Geometrijske značajke definiraju se nakon radnih principa proizvoda [377]. Može se zaključiti da je izbor materijala za izradu komponenata proizvoda uvjetovan zahtjevima za oblikovanje koji su u konačnici određeni tek nakon u što su potpuno definirani principijelna rješenja i struktura proizvoda [44].

*LCA* pruža adekvatnu potporu procjeni utjecaja proizvoda na okoliš, no metoda kao takva nije pogodna za primjenu u ranim fazama konstruiranja [206]. Kako bi se pokrio širok spektar rješenja koja je moguće generirati u kreativnim ranim fazama konstruiranja, provedba *LCA-a* bi zahtijevala njezinu provedbu za svaki koncept, a svaki od njih najčešće ima sasvim drukčiji životni ciklus. Kao posljedica toga, koncepti su teško usporedivi, odnosno pravovaljana ocjena ekološke prihvatljivosti zahtijeva dodatne resurse što se tiče vremena za modeliranje i prikupljanje podataka te dodatne troškove.

### 2. Koji su kriteriji ekološke prihvatljivosti koji se mogu primijeniti pri vrednovanju ekološke prihvatljivosti tehničkih sustava u konceptualnoj fazi razvoja tehničkih sustava?

Pregledom literature o metodama i alatima ekodizajna potvrđena je potreba za definiranjem kriterija ekološke prihvatljivosti koji bi bili specifično namijenjeni vrednovanju ekološke prihvatljivosti konceptijskih rješenja u konceptualnoj fazi razvoja tehničkih sustava (proizvoda). Subjektivna interpretacija ekološki neprihvatljivog koncepta kao prihvatljivog

može u konačnici rezultirati izborom ekološki neprihvatljivog koncepta za daljnju razradu i detaljiranje, a time dodatnim troškovima i kašnjenjem razvojnoga procesa.

Moguća negativna posljedica ovakvog ishoda vrednovanja jest nemogućnost postizanja konsenzusa oko ekološki prihvatljivih i neprihvatljivih konceptijskih rješenja. Na temelju rezultata studije slučaja zaključeno je da su odstupanja individualnog vrednovanja (od ispitnika do ispitanika) bila manja kada su se ispitanici pri vrednovanju služili kvalitativnim kriterijima ekološke prihvatljivosti u obliku smjernica *Eco-Design Value* [82].

Zbog nedostatka podataka o potrošnji energije i materijala te o životnom ciklusu proizvoda u konceptualnoj fazi procesa konstruiranja, identificirana su ograničenja primjene metoda i alata ekodizajna u konceptualnoj fazi razvoja tehničkih sustava. Analizom rezultata studije slučaja ([63], [81]) ustanovljena je potreba za definiranjem kriterija ekološke prihvatljivosti koji bi bili specifično namijenjeni vrednovanju ekološke prihvatljivosti konceptijskih rješenja generiranih u konceptualnoj fazi razvoja tehničkih sustava (proizvoda).

U ovom istraživanju kriteriji ekološke prihvatljivosti definirani su na temelju smjernica za razvoj ekološki i ekonomski prihvatljivih proizvoda ([71], [72]). Pahl i drugi [72] predložili su smjernice za razvoj ekološki i ekonomski prihvatljivih proizvoda prilikom definiranja funkcija proizvoda. Ustanovili su da je potrebno uzeti u obzir promjene oblika energije i promjene agregatnoga stanja materijala te da ih je potrebno biti što manje za razvoj ekološki i ekonomski prihvatljivih proizvoda. Generiranje varijantnih i inovativnih proizvoda može se temeljiti na razmatranju različitih fizikalnih efekata i radnih principa kojima se ostvaruju funkcije proizvoda [72].

S obzirom na to da u literaturi nisu pronađeni formalno definirani kriteriji ekološke prihvatljivosti namijenjeni konceptualnoj fazi razvoja tehničkih sustava, smjernice Pahla i drugih [72] o razvoju ekološki i ekonomski prihvatljivih proizvoda te razvoju varijantnih i inovativnih rješenja poslužile su kao orijentir za definiranje kriterija ekološke prihvatljivosti.

Istraživanjem je predloženo pet kriterija ekološke prihvatljivosti [71]. Kriterij ekoefektivnosti pretvorbi energije i signala temelji se na izračunu faktora solarne transformabilnosti oblika energije [69]. Faktori solarne transformabilnosti oblika energije izvedeni su iz tzv. hijerarhije oblika energije [70], [243]. Vrednovanje prema kriteriju ekoefektivnosti pretvorbi energije i signala provodi se na temelju izračuna faktora transformabilnosti pretvorbi oblika energije iz jednog oblika u drugi (tablica 4.6.). Pozitivno

se vrednuju pretvorbe koje su u smjeru maksimiranja efektivnosti pretvorbi, odnosno pretvorbi oblika energije niže kvalitete u oblike energije više kvalitete.

Drugi po redu kriterij ekološke prihvatljivosti jest kriterij broja pretvorbi energije i signala [71]. Taj su kriterij prvotno predložili Pahl i drugi [72]. Naime, iako zbroj teorijskih ekoefektivnosti pretvorbi energije i signala može upućivati na ekološki prihvatljiviji koncept, ekološki prihvatljiv koncept karakteriziraju što viša ukupna ekoefektivnost pretvorbi energije i signala (vrednovanje prema prvom kriteriju) i što manji broj pretvorbi energije i signala (vrednovanje prema drugom kriteriju).

Kriterij ekološke prihvatljivosti sekundarnih efekata na okoliš odnosi se na sekundarne (latentne) efekte na okoliš koji mogu proizlaziti iz internih transformacija tehničkog sustava i omogućivati isporuku željenih efekata koje tehnički sustav ima za cilj ostvarivati ili iz tehničkog procesa i odabrane tehnologije [73]. Vrednovanje prema ovom kriteriju definirano je na temelju smjernica za vrednovanje toksičnosti emisija ili otpada [74] te smjernica za ekološki prihvatljivo gospodarenje otpadom [75], [76], [315]. Definirana je intervalna ljestvica za ocjenjivanje ekološke prihvatljivosti efekata na okoliš. Vrednovanje prema kriteriju ekološke prihvatljivosti sekundarnih efekata na okoliš provodi se pomoću smjernica za ocjenjivanje (tablica 4.8.).

Četvrti kriterij ekološke prihvatljivosti jest kriterij broja sekundarnih efekata na okoliš [71]. Ekološki prihvatljiv koncept karakteriziraju visoka ukupna ekološka prihvatljivost sekundarnih efekata na okoliš (vrednovanje prema trećem kriteriju) i što manji broj sekundarnih efekata na okoliš (vrednovanje prema četvrtom kriteriju).

Kriterij broja promjena agregatnog stanja materijala odnosi se na pretvorbe pri kojima postoji promjena agregatnoga stanja materijala koji sudjeluje u pretvorbi. Promjena agregatnoga stanja provodi se u specifičnim termodinamičkim uvjetima. Sukladno tomu, postoje posebni zahtjevi da svojstva materijala komponenata proizvoda koja realiziraju s pretvorbom povezane funkcije podržavaju pretvorbu agregatnoga stanja materijala bez promjene svojstava. Prema Pahlu i drugima [72], ekološki prihvatljivi koncepti jesu oni kod kojih ima najmanje takvih funkcija.

### 3. Kako vrednovati ekološku prihvatljivost tehničkih sustava u konceptualnoj fazi razvoja tehničkih sustava?

Prema Derelövu [292], vrednovanje koncepata dio je aktivnosti odlučivanja o najpovoljnijem konceptu. Samom vrednovanju prethodi prikupljanje informacija i analiza

konceptata, a nakon njega slijedi odlučivanje o najpovoljnijim konceptima ili eliminacija neprihvatljivih konceptata iz daljnje razrade (slika 6.1.). Metoda vrednovanja ekološke prihvatljivosti u konceptualnoj fazi razvoja tehničkih sustava temelji se na vrednovanju prema pet kriterija ekološke prihvatljivosti. Predložena metoda i kriteriji ekološke prihvatljivosti za konceptualnu fazu razvoja tehničkih sustava čine glavne teorijske doprinose istraživanja prikazanog u ovome doktorskom radu. Vrednovanje ekološke prihvatljivosti provodi se na temelju vrednovanja značajki transformacija operanada tehničkog procesa (prema [66]), odnosno uspoređivanjem kriterija ekološke prihvatljivosti sa značajkama svojstvenima konceptu tehničkog sustava. Vrednovanje prema svakom od pet kriterija ekološke prihvatljivosti provodi se na osnovi funkcija dobrote (9) i (11), broja pretvorbi energije i signala, broja sekundarnih efekata na okoliš i broja promjena agregatnoga stanja materijala. Rangiranje konceptata provodi se na temelju metode suma rangova [90].

Validacija metode vrednovanja ekološke prihvatljivosti povedena je na temelju metode *validacijskog kvadrata* [72] kojom su provjerene unutarnja konzistentnost i vanjska relevantnost predložene metode. Rezultati vrednovanja predloženom metodom uspoređeni su s rezultatima vrednovanja ekološke prihvatljivosti konceptata pranja rublja (studija slučaja) i rezultatima procjene životnog ciklusa – *LCA* [1]. Provjera empirijske učinkovitosti metode provedena je i na osnovi usporedbe s rezultatima vrednovanja triju koncepta stolnog sata budilice u radu Bernsteina i drugih [50]. Rezultati validacije metode upućuju na potvrdu hipoteze istraživanja da se kriteriji ekološke prihvatljivosti konceptijskih rješenja tehničkih sustava mogu odrediti na osnovi značajki transformacija operanada tehničkog procesa za određenu funkcijsku strukturu tehničkog sustava.

U konceptualnoj fazi definiraju se kriteriji vrednovanja radi donošenja konačne odluke o rješenju koje će rezultirati gotovim proizvodom. Provedenim je istraživanjem potvrđeno da je moguće ostvariti vrednovanje ekološke prihvatljivosti u konceptualnoj fazi procesa konstruiranja tijekom koje uobičajeno nedostaju podatci za procjenu utjecaja na okoliš (*LCA*) konceptata proizvoda.

## **7.2. Obrazloženje znanstvenih doprinosa istraživanja**

Kriteriji ekološke prihvatljivosti i predložena metoda vrednovanja ekološke prihvatljivosti konceptijskih rješenja tehničkih sustava čine glavne teorijske i praktične doprinose provedenoga dokorskog istraživanja. Metodološki doprinos istraživanja očituje se u načinu provjere i validacije konzistentnosti, učinkovitosti i primjenjivosti kriterija ekološke

prihvatljivosti i predložene metode. Vrednovanje ekološke prihvatljivosti kriterijima i predloženom metodom temelji se na analizi lanaca fizikalnih efekata, transformacija energije, materijala i signala u tehničkom procesu te vrednovanju sekundarnih efekata na okoliš koncepata tehničkih sustava. Rezultat primjene metode jest rangiranje konceptijskih rješenja na osnovi kriterija ekološke prihvatljivosti.

Svrishodnost metode provjerena je na primjerima koncepata pranja rublja te stolnih satova budilica. Resursi koji su nužni za primjenu metode uobičajeno su dostupni u konceptualnoj fazi procesa konstruiranja. Praktična primjenjivost predložene metode ostvarena je tako da su podaci o koracima metode, kriterijima ekološke prihvatljivosti i smjernicama za primjenu metode sadržani u obliku tablica. Detaljnost informacija koje konstruktori trebaju generirati tijekom primjene metode sukladna je zahtijevanoj razini detaljnosti za konceptualnu fazu.

Zbog nedostatka informacija o značajkama konačnoga rješenja proizvoda i njegova životnog ciklusa, nedovoljno iskustva ili znanja o kriterijima i vrednovanju ekološke prihvatljivosti, metodama vrednovanja ili manjku praktičnog iskustva u vrednovanju ekološke prihvatljivosti koncepata proizvoda, konstruktori mogu pribjeći subjektivnoj interpretaciji ekološke prihvatljivosti koncepata. Moguće negativne posljedice subjektivne interpretacije ekološke prihvatljivosti koncepata jesu izbor ekološki neprihvatljivog koncepta te dodatni troškovi i kašnjenje razvojnoga procesa.

Prvi je razlog tomu što izmjena koncepta u podmaklim fazama razvoja zahtijeva dodatne troškove i odgodu planiranih aktivnosti radi implementacije izmjena na proizvodu, konceptu proizvoda, modelu proizvoda i životnom ciklusu proizvoda. Drugi razlog dodatnim troškovima i neželjenom kašnjenju procesa konstrukcijske razrade i time cjelokupnoga razvojnoga procesa jest u tome što koncepti koji nisu razmatrani s obzirom na kriterij ekološke prihvatljivosti ili nisu optimalni izbor prema ovom kriteriju uzrokuju utjecaje na okoliš koje konstruktori nisu ranije predvidjeli. Smanjivanje rizika od neprimjerenih utjecaja na okoliš može zahtijevati dodatne troškove koji mogu biti troškovi procesa razvoja, proizvodni troškovi ili troškovi životnog ciklusa proizvoda. Stoga se izbor ekološki neprihvatljivog koncepta teško može ispraviti u kasnijim fazama procesa konstruiranja bez dodatnih troškova i kašnjenja procesa razvoja.

Teorijski doprinos istraživanja prikazana u ovome doktorskom radu ostvaren je razvojem kriterija ekološke prihvatljivosti i predložene metode [69] koji su specifično namijenjeni za konceptualnu fazu razvoja tehničkih sustava. Teorija tehničkih sustava [64]



poslužila je kao teorijski okvir za analizu vrednovanja utjecaja na okoliš u konceptualnoj fazi razvoja tehničkih sustava. Kriterijima i predloženom metodom vrednovanja ekološke prihvatljivosti [83] daje se doprinos aktivnostima vrednovanja ekološke prihvatljivosti u konceptualnoj fazi razvoja tehničkih sustava (proizvoda) tako da se:

1. omogućuje vrednovanje i usporedba ekološke prihvatljivosti konceptijskih rješenja na temelju njihovih lanaca fizikalnih efekata i sekundarnih efekata na okoliš,
2. smanjuje mogući neželjeni utjecaj subjektivnog tumačenja ekološke prihvatljivosti prilikom usporedbe više koncepata i odlučivanja o ekološki povoljnim i nepovoljnim karakteristikama konceptijskih rješenja,
3. odgađa procjena utjecaja na okoliš do faze konstrukcijske razrade, kada će biti dostupno više informacija o rješenju koje se razvija.

Za rane faze procesa razvoja proizvoda karakterističan je nedostatak znanja o budućemu proizvodu i njegovim karakteristikama ([5], [11]), što onemogućava vrednovanje ekološke prihvatljivosti proizvoda uobičajeno primjenjivanim metodama kvantifikacije utjecaja proizvoda na okoliš. Vrednovanje ekološke prihvatljivosti koncepata isključivo na temelju procjene životnog ciklusa nije potpuno primjenjivo u konceptualnoj fazi razvoja proizvoda. Bez kvalitativnoga vrednovanja potrošnje energije, emisija i otpada koji pridonose utjecajima na okoliš, vrednovanje ekološke prihvatljivosti svodi se na subjektivnu prosudbu donositelja odluka o kritičnosti ili relevantnosti procijenjenih utjecaja na okoliš. Razvojem kriterija ekološke prihvatljivosti [69] ostvaren je teorijski doprinos razvoju ekološki prihvatljivih proizvoda na način da je omogućeno kvalitativno vrednovanje ekološke prihvatljivosti u konceptualnoj fazi.

Znanstveni doprinos istraživanja opisana u doktorskom radu također se očituje doprinosom metodologiji validacije kriterija ekološke prihvatljivosti [83]. Validacija unutarnje konzistentnosti i vanjske relevantnosti zahtijevala je definiranje adekvatnoga primjera (skup koncepata pranja rublja) i razvoj metode vrednovanja ekološke prihvatljivosti namijenjene konceptualnoj fazi (predložena metoda).

Iako se *LCA* metoda smatra jedinom objektivnom metodom vrednovanja ekološke prihvatljivosti, općenito nije primjerena za konceptualnu fazu razvoja proizvoda [315]. U preliminarnoj fazi istraživanja razmatrana je mogućnost primjene metoda ekodizajna za generiranje ekološki prihvatljivih koncepata koji bi potom služili kao primjer na kojemu će se

propitivati predložena metoda. Ustanovljeno je da metode i alati ekodizajna nisu specifično namijenjeni generiranju ekološki prihvatljivih koncepata [380]. Tek nakon konceptualne faze, konstruktori pristupaju konstrukcijskoj razradi rješenja na temelju specifikacija proizvoda kojima se determiniraju karakteristike proizvoda. Po uzoru na prijedlog Collado-Ruiz i Ostad-Ahmad-Ghorabi [37] da se ispitivanje ekološke prihvatljivosti koncepata proizvoda generiranih u konceptualnoj fazi razvoja provede *LCA* metodom, empirijski dio validacije vrednovanja predloženom metodom proveden je primjenom i *LCA* metode [83].

Praktični doprinos provedenog istraživanja očituje se razvojem metode vrednovanja ekološke prihvatljivosti za konceptualnu fazu razvoja tehničkih sustava [83]. Vrednovanjem i usporedbom ekološke prihvatljivosti konceptijskih rješenja omogućeni su analiza i razmatranje ekološke prihvatljivosti konceptijskih rješenja proizvoda na temelju vrednovanja lanaca efekata i sekundarnih efekata na okoliš konceptijskih rješenja.

### **7.3. Smjernice budućih istraživanja**

Novija istraživanja u području primjene ekodizajna u konceptualnoj fazi bave se razvojem računalne potpore za generiranje ekološki prihvatljivih koncepata. U takvim sustavima informacije o proizvodima pohranjene su u bazi (repozitoriju) koju je moguće pretraživati i koristiti se njome za računalom podržano generiranje novih koncepata proizvoda.

Oman i drugi [197] razvili su takav sustav pri kojemu se u bazi podataka nalaze funkcije i komponente proizvoda. Funkcijskom dekompozicijom identificirane su funkcije i komponente postojećih proizvoda koji su na neki način okarakterizirani kao inovativni i pohranjeni u bazu. Oman i drugi [197] definiraju inovativne koncepte proizvoda kao realizaciju novih i originalnih ideja u obliku koncepata proizvoda. Inovativnost koncepata može biti inkrementalna ili radikalna, već ovisno o magnitudi poboljšanja kvalitete proizvoda ili inovativnosti tehnologije u usporedbi s proizvodima prisutnima na tržištu. S obzirom na to da spomenuti autori ne razmatraju fizikalne efekte kojima se ostvaruju funkcije proizvoda pohranjenih u bazi, jedna od smjernica budućih istraživanja jest generirati nove koncepte na temelju lanaca efekata proizvoda iz baze. Razmatranjem alternativnih lanaca efekata moguće je generirati nove funkcijske strukture ili načine ostvarivanja funkcija i radne principe.

Collado-Ruiz i Ostadt-Ahmad-Ghorabi [38] uvidjeli su praktičnost sustava za pohranu podataka o proizvodima, te su razvili potporu procjeni utjecaja na okoliš novih proizvoda, a na temelju utjecaja na okoliš sličnih proizvoda pohranjenih u repozitorij. Prednosti

repozitorija sustava za automatizirano generiranje koncepata proizvoda jesu u ponovnoj uporabi povoljnih parcijalnih rješenja, bilo da je riječ o inovativnim ili ekološki prihvatljivim rješenjima [35]. Apstraktno prikazivanje proizvoda u obliku funkcija i putem funkcijske dekompozicije je važan aspekt razvoja u konceptualnoj fazi [381], no, osim njih, važni su i radni principi te fizikalni efekti.

Razvoj leksikona funkcija [210], [211] i njegova implementacija za zapisivanje i modeliranje novih modela funkcija proizvoda omogućili su automatsko generiranje koncepata preko morfološke matrice, analizu kompleksnih tehničkih sustava i, pretpostavlja se, potporu generiranju novih koncepata analogijom [197]. Ovakav sustav ima potencijal da bude obogaćen leksikonima ili katalogima fizikalnih efekata [298]. Uz implementaciju vrednovanja ekološke prihvatljivosti originalnih proizvoda predloženom metodom omogućilo bi se vrednovanje novogeneriranih koncepata proizvoda, odnosno proizvoda koji nisu u repozitoriju analiziranih proizvoda te o kojima ne postoji dovoljno podataka za analizu životnog ciklusa i procjenu utjecaja na okoliš (*LCA*).

Prema Bernsteinu i drugima [330], svi su novi koncepti inačice ili kombinacije postojećih (što i omogućuje procjenu utjecaja na okoliš na temelju podataka o prijašnjim proizvodima pohranjenima u repozitorij proizvoda). No koncepti proizvoda koji su originalni i temelje se na fizikalnim efektima ili kombinaciji efekata kojim se na inovativan ili neočekivan način ostvaruju funkcije proizvoda, često nisu osnova za pretraživanje u bazama podataka.

Eisenhard [59] je predložio klasifikaciju proizvoda prema karakteristikama proizvoda i aproksimaciju utjecaja na okoliš prema grupama proizvoda. Sousa i Wallace [18] te Sousa i drugi [62] dali su doprinos razvoju klasifikacije proizvoda prema utjecajima na okoliš i obilježjima životnog ciklusa. Kriteriji ekološke prihvatljivosti i predložena metoda koji su razvijeni u istraživanju prikazanom u ovome doktorskom radu dobra su polazna točka za nastavak razvoja klasifikacijskog sustava opisivanja proizvoda (Eisenhard [59], Sousa i Wallace [18] te Sousa i drugi [62]) kojemu je nedostajala kvalitativna komponenta vrednovanja ekološke prihvatljivosti koncepata proizvoda. Kvalitativni deskriptori dobrote (ekološke prihvatljivosti) koncepcijskih rješenja temeljili bi se na vrednovanju prema kriterijima ekološke prihvatljivosti razvijenima u sklopu ove disertacije. Time bi se upotpunio zahtjev da tehnički sustavi u konceptualnoj fazi razvoja budu vrednovani kvalitativno, ali i kvantitativno uzimajući u obzir poznate parametre rješenja.

# LITERATURA

- [1] International Organization for Standardization. Environmental management - Life cycle assessment - Principles and framework, ISO 14040:2006. 2nd ed. Geneva: International Organization for Standardization; 2006.
- [2] Kobayashi H. A systematic approach to eco-innovative product design based on life cycle planning. *Advanced Engineering Informatics*. 2006;20:113-125.
- [3] Bhander GS, McAloone TC, Hauschild M. Implementation of Life Cycle Assessment in Product Development. *Environmental Progress*. 2003;22(4):255-267.
- [4] Hauschild M, Jeswiet J, Alting L. From Life Cycle Assessment to Sustainable Production: Status and Perspectives. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*. 2005;54(2):1-21.
- [5] Lindahl M. Engineering Designers' Requirements on Design for Environment Methods and Tools [dissertation]. Stockholm: Royal Institute of Technology; 2005.
- [6] Tischner U. Tools for Ecodesign and Sustainable Product Design. In: Charter M, Tischner U, editors. *Sustainable Solutions: Developing Products and Services for the Future*. Sheffield: Greanleaf Publishing Limited; 2001. p. 263-281.
- [7] Ulrich KT, Eppinger SD. *Product Design and Development*. 5th ed. New York: McGraw-Hill; 2011.
- [8] Brezet H. Dynamics in Ecodesign Practice. *Industry and Environment*. 1997;20(1):21-24.
- [9] May G. Integration of Sustainability into New Product Design [dissertation]. Milano: Politecnico di Milano; 2010.
- [10] Bhamra T, Hernandez R, Mawle R. Sustainability: Methods and Practices. In: Walker S, Giard J, editors. *The Handbook of Design for Sustainability*. London: Bloomsbury Academic; 2013. p. 100-120.
- [11] Ullman DG. *The Mechanical Design Process*, 4th edition. New York: The McGraw-Hill Companies, Inc.; 2010.

- [12] Haapala KR, Poppa KR, Stone RB, Tumer IY. Automating Environmental Impact Assessment during the Conceptual Phase of Product Design. AAAI 2011 Spring Symposium: Artificial Intelligence and Sustainable Design; Palo Alto, 21.-23.03.2011.
- [13] Kengpol A, Boonkanit P. The decision support framework for developing Ecodesign at conceptual phase based upon ISO/TR 14062. *International Journal of Production Economics*. 2011;131(1):4-14.
- [14] Pugh S. Conceptual Design. In: Pugh S, editor. *Total Design: Integrated Methods for Successful Product Engineering*. Reading: Addison-Wesley; 1991, pp. 67-100.
- [15] Carillo-Hermosilla J, Del Rio P, Könnölä T. Diversity of Eco-Innovations: Reflections from Selected Case Studies. *Journal of Cleaner Production*. 2010;18(10-11):1073-1083.
- [16] Dewulf W, Willems B, Duflou JR. Estimating the environmental profile of early design concepts. In: Brissaud D, Tichkiewitch S, Zwolinski P, editors. *Innovation in Life Cycle Engineering and Sustainable Development*. Dordrecht: Springer; 2006. p. 321-334.
- [17] Voss M, Dewulf W, Willems B, Duflou J, Birkhofer H. A Proposal to Adapt Design for Environment Methods to the level of Abstraction Needed in Early Phases of Product Development. In: Meerkamm H, editor. 16. Symposium on Design for X; Neukirchen; Erlangen, 13.-14.10.2005. Neukirchen; Erlangen: Friedrich-Alexander University Erlangen-Nürnberg; 2005.
- [18] Sousa I, Wallace D. Product Classification to Support Approximate Life-Cycle Assessment of Design Concepts. *Technological Forecasting & Social Change*. 2006;73(3):228-249.
- [19] Bhamra TA, Evans S, McAloone TC, Simon M, Poole S, Sweatman A. Integrating Environmental Decisions into the Product Development Process: Part I. The Early Stages. In: Yoshikawa H, Yamamoto R, Kimura F, Suga T, Umeda Y, editors. *First International Symposium On Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing - EcoDesign '99*; Tokyo, Japan, 1.-3.2.1999. Tokyo: IEEE; 1999.
- [20] Graedel TE, Allenby BR. *Industrial ecology*. New Jersey: Prentice Hall; 1995.
- [21] Wang J. Ranking Engineering Design Concepts Using a Fuzzy Outranking Preference Model. *Fuzzy Sets and Systems*. 2001;119(1):161-170.
- [22] Wang Q, Potter N. Incorporating life cycle costing in early product design. *International Journal of Advanced Manufacturing Systems*. 2006;10(1):33-40.
- [23] Eger T, Eckert C, Clarkson PJ. The Role of Design Freeze in Product Development. In: Samuel A, Lewis W, editors. *15th International Conference on Engineering Design - ICED 05*; Melbourne, Australia, 15.-18.8.2005. Barton, A.C.T.: Engineers Australia; 2005.
- [24] Tischner U, Charter M. Sustainable Product Design. In: Charter M, Tischner U, editors. *Sustainable Solutions: Developing Products and Services for the Future*. Sheffield: Greanleaf Publishing Limited; 2001. p. 118-138.
- [25] Bohm MR, Haapala KR, Poppa K, Stone RB, Tumer IY. Integrating Life Cycle Assessment Into the Conceptual Phase of Design Using a Design Repository. *Journal of Mechanical Design*. 2010;132(9):091005-12.

- [26] Asiedu Y, Gu P. Product life cycle cost analysis: state of the art review. *International Journal of Production Research*. 1998;36(4):883-908.
- [27] Maxwell D, van der Vorst R. Developing sustainable products and services. *Journal of Cleaner Production*. 2003;11(8):883-895.
- [28] Rebitzer G, Ekvall T, Frischknecht R, Hunkeler D, Norris G, Rydberg T, Schmidt W-P, Suh S, Weidema BP, Pennington DW. Life cycle assessment Part 1: Framework, goal and scope definition, inventory analysis, and applications. *Environment International*. 2004;30:701-720.
- [29] Schischke K, Hagelüken M. An Introduction to EcoDesign Strategies –Why, what and how? [Internet]. Cardiff: Fraunhofer IZM; 2005 [cited 2015 Nov 1]. Available from: <http://www.ecodesignarc.info/servlet/is/540/Intro%20to%20EcoDesign%20Cardiff.pdf?command=downloadContent&filename=Intro%20to%20EcoDesign%20Cardiff.pdf>
- [30] Seo K-K, Park JH, Jang D-S, Wallace DR. Approximate Estimation of the Product Life Cycle Cost Using Artificial Neural Networks in Conceptual Design. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2002;19:461-471.
- [31] Eddy D. Sustainability-Based Product Design in a Decision Support Semantic Framework [dissertation]. Cambridge (MA): University of Massachusetts; 2014.
- [32] Sakao T, Fargnoli M. Creating Strategy with Demand-side Approach in Early Stages of Ecodesign. *International Journal of Environmentally Intelligent Design & Manufacturing*. 2013;1(2):1-24.
- [33] Blanchard BS, Fabrycky WJ. *Systems engineering and Analysis*. 4th ed. New Jersey: Englewood Cliffs, Prentice Hall; 1990.
- [34] Curran MA. *Life Cycle Assessment: Principles and Practice*. US EPA; 2006.
- [35] Gilchrist B, Van Bossuyt DL, Tumer IY. Functional Impact Comparison of Common and Innovative Products. In: *International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference - ASME 2013*, Portland, Oregon, USA, 04.-07.08.2013. Portland: American Society of Engineering Design; 2013.
- [36] Bevilacqua M, Ciarapica FE, Giacchetta G. *Design for Environment as a Tool for the Development of a Sustainable Supply Chain*. London: Springer Verlag London Limited; 2012.
- [37] Collado-Ruiz D, Ostad-Ahmad-Ghorabi H. Influence of Environmental Information on Expert-perceived Creativity of Ideas. In: Taura T, Nagai Y, editors. *Design Creativity 2010*; London: Springer; 2011, p. 71-78.
- [38] Collado-Ruiz D, Ostad-Ahmad-Ghorabi H. Estimating Environmental Behavior without Performing an LCA. *Journal of Industrial Ecology*. 2013;17(1):31-42.
- [39] Wang X, Chan HK, Li D. A case study of an integrated fuzzy methodology for green product development. *European Journal of Operational Research*. 2015;241:212–223.
- [40] Eisenbart B, Gericke K, Blessing L. An analysis of functional modeling approaches across disciplines. *Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing*. 2013;27(3):281-289.
- [41] Chakrabarti A, Blessing LTM. An Anthology of Theories and Models of Design: Philosophy, Approaches and Empirical Explorations. In: Chakrabarti A, Blessing LTM, editors. *London: Springer-Verlag London*; 2014.

- [42] Mebolt M, Matthiesen S, Lohmeyer Q. The Dilemma of Managing Iterations in Time-to-market Development Processes. In: Heisig P, Clarkson J, editors. 2nd International Workshop on Modelling and Management of Engineering Processes MMEP; Cambridge, 29.- 30.11.2012. Cambridge: The Design Society; 2012.
- [43] Toniolo S, Mazzi A, Garato VG, Aguiari F, Antonio Scipioni A. Assessing the “design paradox” with life cycle assessment: A case study of a municipal solid waste incineration plant. *Resources, Conservation and Recycling*. 2014;91:109–116.
- [44] Andreasen MM, Hein L. Integrated product development. Berlin: IFS Publications, Springer; 1987.
- [45] Keller R, Eckert CM, Clarkson PJ. Through-life Change Prediction and Management. In: Bouras A, Gurumoorthy B, McMahon C, Ramani K, editors. International Conference on Product Lifecycle Management – PLM'08; Seoul, 9.-11.7.2008. Seoul: KAIST; 2008.
- [46] Byggeth S, Hochschorner E. Handling trade-offs in Ecodesign tools for sustainable product development and procurement. *Journal of Cleaner Production*. 2006;14:1420-1430.
- [47] Akao Y. Quality Function Deployment. Portland: Productivity Press; 1990.
- [48] Bârsan L, Bârsan A, Paralika M. Considerations about Reducing the Environmental Impact in the Product Using Stage. *Scientific Bulletin of the Petru Maior University of Tirgu Mures*. 2009;6(23):194-197.
- [49] Puglieri FN, Ometto A, Miguel PAC. Eco-design methods for developing new products based on QFD: a literature analysis. *Product: Management & Development*. 2011;9(1):23-29.
- [50] Bernstein WZ, Ramanujan D, Devanathan S, Zhao F, Sutherland J, Ramani K. Function Impact Matrix for Sustainable Concept Generation: A Designer's Perspective. In: ASME 2010 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference, Volume 6: 15th Design for Manufacturing and the Lifecycle Conference; Montreal, Quebec, Canada, 15.-18.8.2010. Montreal: ASME; 2010.
- [51] Boks C. The Soft Side of Ecodesign. *Journal of Cleaner Production*. 2006;14(15-16):1346-1356.
- [52] Devanathan S, Ramanujan D, Bernstein WZ, Zhao F, Ramani K. Integration of Sustainability Into Early Design Through the Function Impact Matrix. *Journal of Mechanical Design*. 2010;132(8):1-8.
- [53] Sakao T. A QFD-Centred Design Methodology for Environmentally Conscious Product Design. *International Journal of Production Research*. 2007;45(18-19):4143-4162.
- [54] Bocken NMP, Allwood JM, Willey AR, King JMH. Development of a tool for rapidly assessing the implementation difficulty and emissions benefits of innovations. *Technovation*. 2012;32:19–31.
- [55] Tyl B, Legardeur J, Millet D, Vallet F. A comparative study of ideation mechanisms used in eco-innovation tools. *Journal of Engineering Design*. 2015;25(10-12):325-345.

- [56] Vallet F, Tyl B, Millet D, Eynard B. Chapter 114. A method to select best nuggets from eco-innovation sessions. In: Ferreira T, editor. *Green Design, Materials and Manufacturing Processes*. CRC Press; 2013, p. 647-653.
- [57] Gaha R, Benamara A, Yannou B. Eco-designing with CAD Features: Analysis and Proposals. *Advances in Mechanical Engineering*. 2013 Jan;5:1-11. doi: 10.1155/2013/531714.
- [58] Ye Y, Jankovic M, Kremer G, Yannou B, Leroy Y, Bocquet J-C. Integration of environmental impact estimation in system architecture and supplier identification. *Research in Engineering Design*. 2015 Dec;1-24. doi: 10.1007/s00163-015-0208-x.
- [59] Eisenhard JL. *Product Descriptors for Early Product Development: An Interface between Environmental Experts and Designers* [master thesis]. Cambridge (MA): Massachusetts Institute of Technology; 2000.
- [60] Fitch P, Cooper JS. Life-cycle modeling for adaptive and variant design. Part 1: Methodology. *Research in Engineering Design*. 2005;15:216-228.
- [61] Fitzgerald DP, Herrmann JW, Schmidt LC. A Conceptual Design Tool for Resolving Conflicts Between Product Functionality and Environmental Impact. *Journal of Mechanical Design*. 2010;132(9).
- [62] Sousa I, Wallace DR, Eisenhard JL. Approximate Life-Cycle Assessment of Product Concepts Using Learning Systems. *Journal of Industrial Ecology*. 2000;4(4).
- [63] Midžić I, Štorga M, Marjanović D. Using ecodesign guidelines for concept evaluation: Findings from an experiment. In: Marjanović D, Štorga M, Pavković N, Bojčetić N, editors. *13th International Design Conference – DESIGN 2014*; Cavtat - Dubrovnik, 19.-22.5.2014. Zagreb/Glasgow: Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture/The Design Society; 2014.
- [64] Hubka V, Eder WE. *Theory of Technical Systems - A Total Concept Theory for Engineering Design*. Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag; 1988.
- [65] Hubka V, Eder WE. *Engineering Design: General Procedural Model of Engineering Design*. Berlin, Heidelberg, Njemačka: Springer-Verlag; 1992.
- [66] Hubka V, Eder WE. *Design Science: Introduction to the Needs, Scope and Organization of Engineering Design Knowledge* [Internet]. [cited 2015 Nov 1]. London: Springer-Verlag London Limited. Available from: <http://deseng.ryerson.ca/DesignScience/>.
- [67] Kroes P. *Technical Artefacts: Creations of Mind and Matter: A Philosophy of Engineering Design*. Dordrecht: Springer Science & Business Media B.V.; 2012.
- [68] Ranjan BSC, Srinivasan V, Chakrabarti A. System-Environment View in Designing. In: Chakrabarti A, editor. *CIRP Design 2012*. London: Springer; 2013. p. 59-70.
- [69] Midžić I, Štorga M, Marjanović D. Eco-evaluation of Technical Systems in the Conceptual Phase. In: Weber C, Husung S, Contamessa M, Cascini G, Marjanović D, Bordegoni M, et al, editors. *Proceedings of 20th International Conference on Engineering Design - ICED15, Vol. 5: Design Methods and Tools – part 1*; Milano, Italy, 27.-30.7.2015. Milano: The Design Society; 2015.
- [70] Odum HT. Self-organization, transformity, and information. *Science*. 1988;242:1132-1139.



- [71] Midžić I, Štorga M, Marjanović D. Energy quality hierarchy and "transformity" in evaluation of product's working principles. In: Lien TK, editor. *Procedia CIRP: 21st CIRP Conference on Life Cycle Engineering*, Vol. 15, Trondheim, Norway, 18.-20.6.2014. p. 300-305; Trondheim: Elsevier B.V.; 2014.
- [72] Pahl G, Beitz W, Feldhusen J, Grote KH. *Engineering Design: A Systematic Approach*. 3rd ed. Berlin: Springer Verlag, 2007.
- [73] Midžić I, Marjanović D. Estimation of environmental effects in early product development. In: *Proceedings of the 5th International Congress of International Association of Societies of Design Research - IASDR13*; Tokyo, Japan, 26.-30.08.2013. Tokyo: International Association of Societies of Design Research/Japanese Society for the Science of Design/Japan Society of Kansei Engineering/Science Council of Japan; 2013.
- [74] Allione C, De Giorgi C, Lerma B, Petrucci L. From ecodesign products guidelines to materials guidelines for a sustainable product. Qualitative and quantitative multicriteria environmental profile of a material. *Energy*. 2012;39:90-99.
- [75] Hill MK. *Understanding Environmental Pollution*. 2nd edition. New York: Cambridge University Press; 2004.
- [76] Zbicinski I, Stavenuiter J, Kozłowska B, van de Coevering HPM. *Product Design and Life Cycle Assessment*. Uppsala: The Baltic University Press; 2006.
- [77] Seepersad CC, Pedersen K, Emblemavåg J, Bailey R, Allen JK, Mistree F. The Validation Square: How Does One Verify and Validate a Design Method? In: Lewis KE, Chen W, Schmidt LC, editors. *Decision Making in Engineering Design*, New York: ASME; 2006.
- [78] Blessing LTM, Chakrabarti A. *DRM – A Design Research Methodology*. London: Springer Verlag; 2009.
- [79] Tkalac Verčić A, Sinčić Ćorić D, Pološki Vokić N. *Priručnik za metodologiju istraživačkog rada: kako osmisлити, provesti i opisati znanstveno i stručno istraživanje*. Zagreb: M.E.P. d.o.o.; 2010.
- [80] Saunders MNK, Rojon C. On the attributes of a critical literature review. *Coaching: An International Journal of Theory, Research and Practice*. 2011;4.2:156-162.
- [81] Midžić I, Štorga M, Marjanović D. Eco-Evaluation in Conceptual Design Phase – A Case Study. *Transactions of FAMENA*. 2015;39(3):47-60.
- [82] Koh S-Y, Lee S-J, Chang M-K, Liang H-Y, Lee S-H, Boo S-C. Study on the guideline for analyzing ecodesign value system and establishing product design strategy. In: Poggenpohl S, editor. *2007 IASDR Conference: Emerging Trends in Design Research*; Hong Kong, 12.-15.11.2007. Hong Kong: International Association of Societies of Design Research; 2007.
- [83] Midžić I, Štorga M, Marjanović D. Validation of the Eco-transformity Method. In: Marjanović D, Štorga M, Pavković N, Bojčetić N, editors. *14th International Design Conference - DESIGN 2016*; Dubrovnik, Hrvatska, 16.-19.05.2016. Zagreb/Glasgow: Fakultet strojarstva i brodogradnje, Sveučilište u Zagrebu/The Design Society; 2016.
- [84] Lindahl M, Ekermann S. Structure for Categorization of EcoDesign Methods and Tools. In: *Proceedings of the 20th CIRP International Conference on Life Cycle Engineering*, Singapore 17.-19.4.2013. Singapore: Springer Science + Business Media Singapore; 2013. pp. 117-122.

- [85] International Organization for Standardization. Environmental management – Life cycle assessment – Requirements and guidelines, ISO 14044:2006. Geneva: International Organization for Standardization; 2006.
- [86] Goedkoop M, Heijungs R, Huijbregts M, De Schryver A, Struijs J, Van Zelm R. ReCiPe 2008. Netherlands: Ministry of Housing, Spatial Planning and the Environment (VROM); 2009 Jan 06.
- [87] PRé Consultants. SimaPro – World's Leading LCA Software [Internet]. Amersfoort: PRé Consultants; 2015 [cited 2015 Nov 1]. Available from: <http://www.pre-sustainability.com/simapro>
- [88] Ecoinvent. Ecoinvent – the world's most consistent & transparent life cycle inventory database [Internet]. Zürich: The Ecoinvent Centre; 2015 [cited 2015 Nov 1]. Available from: <http://www.ecoinvent.org>
- [89] Weidema BP, Bauer C, Hischer R, Mutel C, Nemecek T, Reinhard J, Vadenbo CO, Wernet G. Overview and methodology - Data quality guideline for the ecoinvent database version 3. Ecoinvent Report 1 (v3), St. Gallen: The Ecoinvent Centre; 2013.
- [90] Roozenburg NFM, Eekels J. Product Design: Fundamentals and Methods. Chichester: John Wiley & Sons; 1995.
- [91] Midžić, I. Razvoj sustava za sintezu koncepcijskih rješenja pomoću gramatike proizvoda [diplomski rad]. Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje; 2009. Available from: [http://repozitorij.fsb.hr/636/1/29\\_06\\_2009\\_Ida\\_Midzic\\_-\\_Diplomski\\_rad.pdf](http://repozitorij.fsb.hr/636/1/29_06_2009_Ida_Midzic_-_Diplomski_rad.pdf)
- [92] Eckert C, Keller R, Clarkson J. Complexity in engineerign design. In: Alexiou K, Johnson J, Zamenopoulos T, editors. Embracing Complexity in Design. New York: Routhledge; 2010.
- [93] Cooper RG. Stage-gate systems: a new tool for managing new products. Business Horizons. 1990 May-Jun.
- [94] Andreasen MM, Hansen CT, Cash P. Conceptual Design: Interpretations, Mindset and Models. Springer International Publishing; 2015. 10.1007/978-3-319-19839-2
- [95] Carlson CS. Understanding and Applying the Fundamentals of FMEAs. In: Janasak K, editor. Proceedings of 60th Annual Reliability and Maintainability Symposium (RAMS 2014); Colorado Springs, 27.-30.1.2014. Colorado Springs: IEEE; 2014.
- [96] Hansen CT, Andreasen MM. Two approaches to synthesis based on the domain theory. In: Chakrabarti A, editor. Engineering Design Synthesis. London: Springer-Verlag; 2002. p. 93-108.
- [97] Zapaniotis A, Dentsoras A. Redundancy eliminations and plausible assumptions of design parameters for evaluating design alternatives. In: Culley SJ, Hicks BJ, McAloon TC, Howard TJ, Dong A, editors. Proceedings of the 18th International Conference on Engineering Design - ICED 11; Vol. 10, pt. 2, Copenhagen, Denmark, 15.-18.8.2011. Copenhagen: The Design Society; 2011.
- [98] International Organization for Standardization. ISO/TR 14062 Technical report: Environmental management – Integrating environmental aspects into product design and development, ISO/TR 14062:2002. Geneva: International Organization for Standardization, Technical Committee ISO/TC 2072002; 2002.

- [99] Poulikidou S. Literature review – Methods and tools for environmentally friendly product design and development. Stockholm: KTH, Royal Institute of Technology; 2012.
- [100] Tuominen J. Integrating environmental aspects into product development projects [master thesis]. Vaasa: Lappeenranta University of Technology; 2011.
- [101] Choi J-K, Ramani K. A Quest for Sustainable Product Design: A Systematic Methodology for Integrated Assessment of Environmentally Benign and Economically Feasible Product Design. Saarbrücken: VDM; 2009.
- [102] Ramani K, Ramanujan D, Bernstein WZ, Zhao F, Sutherland J, Handwerker C, Choi J-K i dr. Integrated Sustainable Life Cycle Design: A Review. *Journal of Mechanical Design*. 2010;132(9).
- [103] Augustine M, Yadav OP, Jain R, Singh Rathore AP. Concept convergence process: A framework for improving product concepts. *Computers & Industrial Engineering*. 2010;59:367-377.
- [104] Takai S, Ishii K. Modifying Pugh's Design Concept Evaluation Methods. In: *Proceedings of Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference - DETC'04*; Salt Lake City, 28.9.-2.10.2004. Salt Lake City: ASME; 2004.
- [105] Huang H-Z, Liu Y, Li Y, Xue L, Wang Z. New evaluation methods for conceptual design selection using computational intelligence techniques. *Journal of Mechanical Science and Technology*. 2013;27(3):733-746.
- [106] Vanegas LV, Labib AW. Application of new fuzzy-weighted average (NFWA) method to engineering design evaluation. *International Journal of Production Research*. 2001;39(6):1147-1162.
- [107] Halog A. Selection of Sustainable Product Improvement Alternatives [dissertation]. Karlsruhe: Karlsruhe Institute of Technology; 2002.
- [108] Saaty TL. How to Make a Decision: The Analytic Hierarchy Process. *European Journal of Operational Research*. 1990;48:9-26.
- [109] Liu Y-C, Bligh T, Chakrabarti A. Towards an 'ideal' approach for concept generation. *Design Studies*. 2003;24:341-355.
- [110] French M. Conceptual design for engineers. 3rd edition. Berlin: Springer-Verlag; 1999.
- [111] Wilhelms S. Function- and constraint-based conceptual design support using exchangeable, reusable principle solution elements, *Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing*. 2005;19:201-219.
- [112] Malmqvist J. Towards Computational Design Methods for Conceptual and Parametric Design [dissertation]. Gothenburg: Chalmers University of Technology; 1993.
- [113] Motte D. A review of the fundamentals of the systematic engineering design process models. In: Marjanović D, Štorga M, Pavković N, Bojčetić N, editors. *10th International Design Conference - DESIGN 2008*; Dubrovnik, 19.-22.5.2008. Zagreb/Glasgow: Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture/The Design Society; 2008.
- [114] Andersson P. A Process Approach to Robust Design in Early Engineering Design Phases [dissertation]. Lund: Lund Institute of Technology; Lund University; 1996.

- [115] Borchardt M, Wendt MH, Peirera GM, Sellitto MA. Redesign of a component based on ecodesign practices: environmental impact and cost reduction achievements. *Journal of Cleaner Production*. 2011;19:49-57.
- [116] Braungart M, McDonough W, Bollinger AT. Cradle-to-cradle design: creating healthy emissions – a strategy for eco-effective product and system design. *Journal of Cleaner Production*. 2007;15(13-14):1337-1348.
- [117] Karlsson R, Luttrupp C. EcoDesign: what's happening? An overview of the subject area of EcoDesign and of the papers in this special issue. *Journal of Cleaner Production*. 2006;14:1291-129.
- [118] Plouffe S, Lanoie P, Berneman C, Vernier M-F. Economic benefits tied to ecodesign. *Journal of Cleaner Production*. 2011;19:573-579.
- [119] Lee K-M, Park P-J. ECODESIGN - Best Practice of ISO/TR 14062. APEC, Eco-product Research Institute, Ajou University, Korea: APEC; 2005.
- [120] Vezzoli C, Sciama D. Life Cycle Design: from general methods to product type specific guidelines and checklists: a method adopted to develop a set of guidelines/checklist handbook for the eco-efficient design of NECTA vending machines. *Journal of Cleaner Production*. 2006;14:1319-1325.
- [121] Luttrupp C, Lagerstedt J. EcoDesign and The Ten Golden Rules: generic advice for merging environmental aspects into product development. *Journal of Cleaner Production*. 2006;14:1396-1408.
- [122] Frei M. Eco-effective product design: the contribution of environmental management in designing sustainable products. *The Journal of Sustainable Product Design*. 1998;7:16-25.
- [123] Vicente J, Frazão R, Moreira da Silva F. The Evolution of Design with Concerns on Sustainability. *Revista Convergências*. 2010;(10).
- [124] Spangenberg JC, Fuad-Luke A, Blincoe K. Design for Sustainability (DfS): the interface of sustainable production and consumption. *Journal of Cleaner Production*. 2010;18:1485-1493.
- [125] Ehrenfeld JR. Eco-efficiency: Philosophy, theory, and tools. *Journal of Industrial Ecology*. 2005;9(4).
- [126] European Commission. *Doing More with Less: Green Paper on Energy Efficiency*. Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities; 2005.
- [127] Aoe T. Eco-Efficiency (Factor X) for Electrical and Electronic Products and a Case Study on Home Appliances in a Household. *Materials Transactions*. 2006;47(3):913-922.
- [128] Aoe T. Eco-efficiency and ecodesign in electrical and electronic products. *Journal of Cleaner Production*. 2007;15:1406-1414.
- [129] Charter M, Tischner U. *Sustainable Solutions: Developing Products and Services for the Future*. Tischner M, Charter U, editors. Sheffield: Greenleaf Publishing Limited; 2001.
- [130] Fargnoli M, Costantino F, Tronci M, Bisillo S. Ecological profile of industrial products over the environmental compliance. *International Journal of Sustainable Engineering*. 2012;6(2):117-130.

- [131] Tukker A, Emmert S, Charter M, Vezzoli C, Sto E, Andersen MM, Geerken T, Tischner U, Lahlou S. Fostering change to sustainable consumption and production: an evidence based view, *Journal of Cleaner Production*. 2008;16:1218-1225.
- [132] Koho M, Tapaninaho M, Heilala J, Torvinen S. Towards a concept for realizing sustainability in the manufacturing industry. *Journal of Industrial and Production Engineering*. 2015;32(1):12-22.
- [133] Bačun D, Matešić M, Omazić MA. Leksikon održivog razvoja. Hrvatski poslovni savjet za održivi razvoj; Zagreb, Hrvatska: Impressum; 2012.
- [134] Vandaele NJ, Decouttere CJ. Sustainable R&D portfolio assessment. *Decision Support Systems*. 2013;54:1521-1532.
- [135] Albino V, Balice A, Dangelico R. Environmental Strategies and Green Product Development: an Overview on Sustainability-Driven Companies. *Business Strategy and the Environment*. 2009;18:83-96.
- [136] Åkermark A-M. The Crucial Role of the Designer in EcoDesign [dissertation]. Stockholm: Royal Institute of Technology; 2005.
- [137] Meinders H, Meuffels M. Product Chain Responsibility – an Industry Perspective. *Corporate Environmental Strategy*. 2001;8(4).
- [138] Knight P, Jenkins JO. Adopting and applying eco-design techniques: a practitioners perspective. *Journal of Cleaner Production*. 2009;17(5):549-558.
- [139] Carvalho AP, Barbieri JC. Innovation and sustainability in the supply chain of a cosmetics company, a case study. *Journal of technology management and innovation*. 2012;7(2):144-156.
- [140] Wimmer W, Zust R, Lee K-M. Ecodesign Implementation – A Systematic Guidance on Integrating Environmental Considerations into Product Development. Dordrecht: Springer; 2004.
- [141] Lewis H, Gertsakis J, Grant T, Morelli N, Sweatman A. Design + Environment: A Global Guide to Designing Greener Goods. Sheffield: Greenleaf Publishing Limited; 2001.
- [142] Chiu M-C, Chu . Review of Sustainable Product Design from Life Cycle Perspectives. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*. 2012;13(7):1259-1272.
- [143] Roche T. Development of a Design for the Environment Workbench [dissertation]. Galway: Galway-Mayo Institute of Technology; 1999.
- [144] Mann S. Visualising Sustainability [Internet]. [cited 2018 Jul 1]. Available from: <https://computingforsustainability.com/2009/03/15/visualising-sustainability>
- [145] Clausson L. Business Innovation by utilizing Engineering Design Theory and Methodology [dissertation]. Stockholm: Royal Institute of Technology (KTH); 2006.
- [146] Desimone LD, Popoff F. Eco-efficiency – The Business Link to Sustainable Development. Cambridge (MA): MIT Press; 1997.
- [147] Brezet H, van Hemel C. ECODESIGN: A promising approach to sustainable production and consumption. Pariz/Delft: United Nations Environmental Programme (UNEP)/Rathenau Institute/Delft University of Technology; 1997.

- [148] Segarra-Oña M, De-Miguel-Molina M, Payá-Martínez A. A Review Of The Literature On Eco-Design In Manufacturing Industry: Are The Institutions Focusing On The Key Aspects. *Review of Business Information Systems – Special Edition*. 2011;15(5).
- [149] Bey N, Hauschild MZ, McAloone TC. Drivers and barriers for implementation of environmental strategies in manufacturing companies. *CIRP Annals*. 2013;62(1):43-46.
- [150] Takahashi T, Ueno K, Ishii K. Evaluation methods and Applications of Factor X Indicator for Realization of a Sustainable Society. *IEEE*; 2005. p. 770-774.
- [151] Reijnders L. The factor X debate - setting targets for eco-efficiency. *Journal of Industrial Ecology*. 1998;2:13-21.
- [152] Ehrenfeld J. Designing ‘Sustainable’ Product/Service Systems. In: *Proceedings of EcoDesign 2001: Second International Symposium on Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing*; Tokyo, Japan; 2001.
- [153] Gaziulusoy AI. System Innovation for Sustainability: A Scenario Method and a Workshop Process for Product Development Teams [dissertation]. Auckland: University of Auckland; 2010.
- [154] Tchertchian N, Millet D, Yvars P-A. How to Improve Environmental Performance by Negotiating Functional Specifications of Complex System? In: *Procedia CIRP - Proceedings of the 21st CIRP Conference on Life Cycle Engineering - CIRP 2014*; Vol. 15, Elsevier B.V., 2014, pp. 449-454.
- [155] Halila F, Hörte SÅ. Innovations that combine environmental and business aspects, *International Journal of Innovation and Sustainable Development*. 2006;1(4).
- [156] Mathieux F, Rebitzer G, Ferrendier S, Simon M, Froelich D. Ecodesign in the European Electr(on)ics Industry. An analysis of the current practices based on cases studies. *The Journal of Sustainable Product Design*. 2001;1:233–245.
- [157] Geels FW. Technological transitions and system innovations: a co-evolutionary and socio-technical analysis, Cheltenham, UK, Northampton, Mass.: Edward Elgar Pub, 2005.
- [158] Chou C-J, Chen C-W, Conley C. An approach to assessing sustainable product-service systems. *Journal of Cleaner Production*. 2015;86:277-284.
- [159] Dewulf W. A pro-active approach to ecodesign: framework and tools [dissertation]. Leuven, Belgija: Katholieke Universiteit Leuven; 2003.
- [160] Kwak M, Kim H. Design for life-cycle profit with simultaneous consideration of initial manufacturing and end-of-life remanufacturing. *Engineering Optimization*. 2015;47(1):18-35.
- [161] Brones F, Monteiro de Carvalho M. From 50 to 1: integrating literature toward a systemic ecodesign model. *Journal of Cleaner Production*. 2015 Jun;96:44-57.
- [162] Pochat SL, Bertoluci G, Froelich D. Integrating ecodesign by conducting changes in SMEs. *Journal of Cleaner Production*. 2007;15:671-680.
- [163] Bovea MD, Pérez-Belis V. A taxonomy of ecodesign tools for integrating environmental requirements into the product design process. *Journal of Cleaner Production*. 2012;20(1):61-71.

- [164] Otto KN, Wood KL. Product Design: Techniques in Reverse Engineering and New Product Development, Upper Saddle River, NJ: Prentice–Hall, 2001.
- [165] Cluzel F, Yannou B, Leroy Y, Millet D. Proposition for an Adapted Management Process to Evolve from an Unsupervised Life Cycle Assessment of Complex Industrial Systems Towards an Eco-Designing Organisation, *Concurrent Engineering: Research and Applications*. 2012;20:111-126.
- [166] Pigosso DCA, Rozenfeld H, Seliger G. Ecodesign Maturity Model: criteria for methods and tools classification. In: *Proceedings of the 8th Global Conference on Sustainable Manufacturing*; Abu Dabi, 2011. Abu Dabi; 2011.
- [167] Hernandez Pardo RJ, Brissaud D, Mathieux F, Zwolinski P. Contribution to the characterisation of eco-design projects. *International Journal of Sustainable Engineering*. 2011;4(4).
- [168] Bras B. Incorporating Environmental Issues in Product Design and Realization. *Industry and Environment*. 1997;20(1-2).
- [169] Tischner U, Schmincke E, Rubik F, Prösler M. How to do Ecodesign? A guide for environmentally and economically sound design. Berlin: German Federal Environmental Agency; 2000.
- [170] Telenko C, Seepersad CC, Weber ME. A Compilation of Design for Environment Principles and Guidelines. In: *Proceedings of ASME 2008 International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference*, New York: ASME; 2008. p. 289-301.
- [171] Volvo Group. STD 100-0004 - Substitutes for hazardous chemical substances - Volvo's white list [Internet]. [cited 2015 Nov 1]. Available from: <https://webstd.volvo.com/webstd/docs/100-0004>
- [172] Volvo Group. STD 100-0003 - Chemical substances which should not be present in processes or products within the Volvo Group - Volvo's grey list [Internet]. [cited 2015 Nov 1]. Available from: <https://webstd.volvo.com/webstd/docs/100-0003>
- [173] Volvo Group. STD 100-0003 - Chemical substances which must not be present in processes or products within the Volvo Group - Volvo's black list [Internet]. [cited 2015 Nov 1]. Available from: <https://webstd.volvo.com/webstd/docs/100-0002>
- [174] Jones E, Stanton NA, Harrison D. Applying structured methods to Ecoinnovation. An evaluation of the Product Ideas Tree diagram. *Design Studies*. 2001;22:519-542.
- [175] Luttrupp C, Karlsson R. The Conflict of Contradictory Environmental Targets. In: *Proceedings EcoDesign 2001: Second International Symposium on Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing*; Tokyo, 11.-15.12.2001. Tokyo: IEEE; 2001.
- [176] van Gorp AC. Ethical issues in engineering design; Safety and sustainability. In: Kroes P, Meijers A., editors. *Delft University of Technology/Eindhoven University of Technology: Simon Stevin Series in the Philosophy of Technology*; 2005.
- [177] Meinders H. Point of no return - Philips EcoDesign guidelines. Eindhoven: Philips Electronics; 1997.
- [178] Namikawa O. Development of the evaluation tool that integrate "Design for Environment" and "Eco-efficiency" at Hitachi". In: *Environmentally Conscious*

- Design and Inverse Manufacturing, International Symposium on EcoDesign 2005, 2005, pp. 240-241.
- [179] Wenzel H, Hauschild M, Alting L. Methodology, tools and case studies in product development. In: Environmental assessment of products, vol. 1. London: Chapman Hall; 1997.
- [180] Van Hemel C, Cramer J. Barriers and stimuli for ecodesign in SMEs, *Journal of Cleaner Production*. 2002;10:439-453.
- [181] Tyl B, Legardeur J, Millet D, Vallet F. Adaptation of the creativity tool ASIT to support eco-ideation phases. In: Bártolo HM, editor. *Green Design, Materials and Manufacturing Processes*. Lisbon: CRC Press; 2013. p. 437-442.
- [182] Pigosso DCA, Sousa SR. Life Cycle Assessment (LCA): Discussion on Full-Scale and Simplified Assessments to Support the Product Development Process. In: 3rd International Workshop. *Advances in Cleaner Production*; São Paulo, Brazil, 18.-20.5.2011. São Paulo: Cleaner Producton Initiative and Challeges for a Sustainable World; 2011.
- [183] Hochschorner E, Finnveden, G. Evaluation of Two Simplified Life Cycle Assessment Methods. *International Journal of Life Cycle Assessment*. 2003;8(3):119-128.
- [184] Lagerstedt J, Luttrupp C, Lindfors L-G. Functional Priorities in LCA and Design for Environment. *International Journal of LCA*. 2003;8(3):160-166.
- [185] Lagerstedt J. Functional And Evironmental Factors In Early Phases Of Product Development - Eco Functional Matrix [dissertation]. Stockholm: KTH; 2003.
- [186] Short TD, Lynch CA. Beyond the Eco-Functional Matrix – design for sustainability and the Durham methodology. In: Bhamra T, Hon B, editors. *Design and Manufacture for Sustainable Development*; Loughborough, 1.-2.9.2004. Suffolk: Professional Engineering Publishing Limited; 2004.
- [187] Fussler C, James P. *Driving Eco Innovation: A Breakthrough Discipline for Innovation and Sustainability*. London: Pitman Publishing; 1996.
- [188] Bovea M, Wang B. Green Quality Function Deployment: A Methodology for Integrating Customer, Cost and Environmental Requirements in Product Design. *International Journal of Environmentally Conscious Design & Manufacturing*. 2005;12:9-19
- [189] Cristofari M, Deshmukh A, Wang B. Green Quality Function Deployment. *International Journal of Environmentally Conscious Design & Manufacturing*. 1996;5(2):13-18.
- [190] Masui K, Sakao T, Kobayashi M, Inaba A. Applying Quality Function Deployment to Environmentally Conscious Design. *International Journal of Quality and Reliability Management*. 2003;20(1):90-106.
- [191] Zhang Y, Wang P, Zhang C. Product Concept Evaluation Using GQFD-II and AHP. *International Journal of Environmentally Conscious Design & Manufacturing*. 1998;7(3):1-15.
- [192] Chen ZY, Yao S, Lin QJ, Zeng Y, Eberlein A. Formalisation of product requirements: from natural language escriptions to formal specifications. *International Journal of Manufacturing Research*. 2007;2(3):362-387.



- [193] Diev S. Requirements development as a modeling activity. *ACM SIGSOFT Software Engineering Notes*. 2007;32(2):1-3.
- [194] Joshi S, Morkos B, Shankar P, Summers DJ, Mocko GM. Requirements in engineering design: What are we teaching? In: *Proceedings of the 9th International Symposium on Tools and Methods of Competitive Engineering, TMCE 2012; Karlsruhe, 7.-11.5.2012*. Karlsruhe: Delft University of Technology; 2012.
- [195] Vindoh S, Rathod G. Integration of ECQFD and LCA for sustainable product design. *Journal of Cleaner Production*. 2010;18(8):833-842.
- [196] Savransky SD: *Engineering of Creativity: Introduction to TRIZ Methodology of Inventive Problem Solving*. Boca Raton: CRC Press; 2000.
- [197] Oman S, Gilchrist B, Tumer IY, Stone R. The development of a repository of innovative products (RIP) for inspiration in engineering design. *International Journal of Design Creativity and Innovation*. 2014;2(4):186-202.
- [198] Devanathan S, Koushik P, Zhao F, Ramani K. Integration of sustainability into early design through working knowledge model and visual tools, 2009.
- [199] Gilchrist B. *Modeling Innovativeness in Consumer Products With the Influence of Environmental Sustainability* [dissertation]. Cambridge (MA): Massachusetts Institute of Technology; 2013.
- [200] Hur T, Lee J, Ryu J, Kwon E. Simplified LCA and matrix methods in identifying the environmental aspects of a product system. *Journal of Environmental Management*. 2005;75:229–237.
- [201] Collado-Ruiz D, Ostad-Ahmad-Ghorabi H. Comparing LCA results out of competing products: developing reference ranges from a product family approach. *Journal of Cleaner Production*. 2009;18(4):355–364.
- [202] Park JH, Seo K-K. Approximate life cycle assessment of product concepts using multiple regression analysis and artificial neural networks. *Journal of Mechanical Science and Technology*. 2003;17(12):1969-1976.
- [203] Sousa I. *Approximate life-cycle assessment of product concepts using learning systems* [dissertation], Cambridge (MA): Massachusetts Institute of Technology; 2002.
- [204] Kota S, Chakrabarti A. A method for Estimating the Degree of Uncertainty With Respect to Life Cycle Assessment During Design, *Journal of Mechanical Design*. 2010;132.
- [205] Zhou CC, Yin GF, Hu XB. Multi-Objective Optimization of Material Selection for Sustainable Products: Artificial Neural Networks and Genetic Algorithm Approach. *Materials and Design*. 2009;30(4):1209-1215.
- [206] Eddy D, Krishnamurty S, Grosse I, Wileden J, Lewis K. A Robust Surrogate Modeling Approach for Material Selection in Sustainable Design of Products. In: *Proceedings of the ASME 2014 International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference - IDETC/CIE 2014; Buffalo, New York, 17.-20.8.2014*. Buffalo: ASME; 2014.
- [207] Chatterjee P, Athawale VM, Chakraborty S. Selection of materials using compromise ranking and outranking methods. *Materials and Design*. 2009;30:4043–4053.

- [208] Design Engineering Lab. Design Repository [Internet]. [cited 2015 Nov 1]. Available from: repository.designengineeringlab.org
- [209] Bohm MR, Stone RB, Szykman S. Enhancing virtual product representations for advanced design repository systems. *J. Comput. Inf. Sci. Eng.* 2005;5(4):360-372.
- [210] Stone R, Wood K. Development of a functional basis for Design, *Journal of Mechanical Design*. 2000;122(4):359–370.
- [211] Hirtz J, Stone R, Mcadams D, Szykman S, Wood K. A Functional Basis for Engineering Design: Reconciling and Evolving Previous Efforts. *Reserach in Engineering Design*. 2002;13:65-82.
- [212] Bohm MR. Information archival and reuse: drawing conclusions from the past [dissertation]. Missouri: Missouri University of Science and Technology; 2009.
- [213] Bohm MR, Stone RB, Simpson TW, Steva ED. Introduction of a Data Schema: The Inner Workings of a Design Repository. In: *Proceedings of ASME International Design Engineering Technical Conferences*, Philadelphia, 10.-13.9.2006. Philadelphia: ASME; 2006.
- [214] Rocco C, Rizzuti S, De Napoli L. A Procedure for Early Environmental Assessment of Industrial Products. In: *Proceedings of the IMProVe*, Venice, Italy, 2011.
- [215] Ramanujan, D., Bernstein, W. Z., Zhao, F., Ramani, K.: Addressing Uncertainties within Product Redesign for Sustainability: A Function Based Framework. In: *Proceedings of the ASME 2011 International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference IDETC/CIE 2011*, Washington, DC, August 28.-31.8.2011. Washington, DC: ASME; 2011.
- [216] Lee DE, Melkanoff MA. Issues in product life cycle engineering analysis. *Advances in Design Automation*. 1993;1:75-86.
- [217] Dahmus J, Gonzalez-Zugasti J, Otto K. Modular product architecture. *Design Studies*. 2001;22(5):409-424.
- [218] Alizon F, Shooter S, Simpson T. Improving an existing product family based on commonality/diversity, modularity, and cost. *Design Studies*. 2007;28(4):387-409.
- [219] Thevenot H, Simpson T. Guidelines to minimize variation when estimating product line commonality through product family dissection. *Design Studies*. 2007;28(2):175–194.
- [220] Hammond GP, Jones CI. Embodied energy and carbon in construction materials. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Energy*. 2008;161(2):87-98.
- [221] Carteron E, Zinck S, Lessard L, Vionnet S, Humbert S. Integrating Water Footprinting into Eco-design: Case Study of a Chair. In: *Proceedings of the 2nd LCA Conference*; Lille France, 6.-7.11.2012. Lille France; 2012.
- [222] Lee CK. Application of the integrated ecodesign method using the GHG emission as a single indicator and its GHG recyclability. *Journal of Cleaner Production*. 2014.
- [223] Miettinen P, Hämäläinen RP. How to benefit from decision analysis in environmental life cycle assessment (LCA). *European Journal of Operational Research*. 1997;102:279–294.

- [224] Munoz MI. Life Cycle Assessment as a tool for Green Chemistry: Application to Different Advanced Oxidation Processes for Wastewater Treatment. Universitat Autònoma de Barcelona, 2006.
- [225] Hendrickson CT, Lave LB, Matthews HS. Environmental Life Cycle Assessment of Goods and Services: An Input-Output Approach. Resources for the Future Press, 2005.
- [226] Azapagic A. Life-cycle Assessment: A Tool for Identification of More Sustainable Products and Processes, 2002.
- [227] Ng, CY, Chuah, KB. Evaluation of Design Alternatives' Environmental Performance Using AHP and ER Approaches. IEEE Systems Journal, 2013;8(4):1182–1189.
- [228] Hertwich EG, Pease WS, Koshland CP. Evaluating the environmental impact of products and production processes: a comparison of six methods. Science of The Total Environment, 1997;196(1):13-29.
- [229] Tchertchian N, Yvars P-A, Millet D. Benefits and limits of a Constraint Satisfaction Problem/Life Cycle Assessment approach for the ecodesign of complex systems: a case applied to a hybrid passenger ferry. Journal of Cleaner Production. 2013;42:1-18.
- [230] Collado-Ruiz D, Ostad-Ahmad-Ghorabi H. Fuon theory: Standardizing functional units for product design. Resources, Conservation and Recycling. 2010;54:683-691.
- [231] Cluzel F, Leroy Y, Yannou B. Toward a structured functional unit definition framework to limit LCA results variability, 6th International Conference on Life Cycle Management (LCM 2013), August 2013, Gothenburg, Sweden, 2013.
- [232] Pennington DW, Potting J, Finnveden G, Lindeijer E, Jolliet O, Rydberg T, Rebitzer G. Life cycle assessment Part 2: Current impact assessment practice. Environment International. 2004;30:721-739.
- [233] Dewulf W, Duflou J. Simplifying LCA Using Indicator Approaches – A Framework. In: CIRP seminar on life cycle engineering; Copenhagen, 5.2003; Copenhagen: IPL; 2003.
- [234] Ostad-Ahmad-Ghorabi H, Collado-Ruiz D, Wimmer W. Towards Integrating LCA into CAD, Proceedings of the 17th International Conference on Engineering Design (ICED 09), Vol. 7, Design for X / Design to X, Palo Alto, CA, USA, 24.-27.08.2009, pp. 301-310.
- [235] Suh S, Lenzen M, Treloar GJ, Hondo H, Horvath A, Huppes G, Jolliet O, Klann U, Krewitt W, Moriguchi Y, Munksgaard J, Norris G. System Boundary Selection in Life-Cycle Inventories Using Hybrid Approaches. Environmental Science & Technology. 2004;38(3):657-664.
- [236] Ness B, Urbel-Piirsalu E, Anderberg S, Olsson L. Categorising tools for sustainability assessment, Ecological Economics. 2007;60:498–508.
- [237] Lyytimäki J. Evaluation of sustainable development strategies and policies: The need for more timely indicators. Natural Resources Forum. 2012;36(2):101-108.
- [238] Kates RW, Parris TM, Leiserowitz AA. What is Sustainable Development? – Goals, Indicators, Values and Practice. Environment: Science and Policy for Sustainable Development. 2005;47(3):8-21.
- [239] OECD. Measuring material flows and resource productivity. Synthesis report, Organisation for Economic Co-operation and Development, 2008.

- [240] Hovelius K. Energy, Exergy- and Emergy Analysis of Biomass Production. Report, vol. 222. Uppsala: Swedish University of Agricultural Sciences; 1997.
- [241] Wall G. Exergy - a Useful Concept within Resource Accounting. Report no. 77-42, Göteborg: Institute of Theoretical Physics; 1977.
- [242] Wall G. On Exergy and Sustainable Development in Environmental Engineering. The Open Environmental Engineering Journal. 2010;3:21–30.
- [243] Odum HT. Environmental accounting, emergy and environmental decision making. Toronto: John Wiley and Sons Inc.; 1996.
- [244] Rosen MA, Dincer I. A study of industrial steam process heating through exergy analysis. International Journal of Energy Research. 2004;28(10):917-930.
- [245] Herendeen RA. Energy analysis and EMERGY analysis - A comparison. Ecological Modelling. 2004;178(1):227-237.
- [246] Kanoglu M, Dincer I, Cengel YA. Exergy for better environment and sustainability. Environment, Development and Sustainability. 2009;11(5):971-988.
- [247] Dincer I, Rosen MA. Exergy: Energy, Environment and Sustainable Development. Amsterdam: Elsevier; 2007.
- [248] Nilsson D. Energy, exergy and emergy analysis of using straw as fuel in district heating plants. Biomass and Bioenergy. 1997;13(1/2):63-73.
- [249] Ulgiati S, Brown MT. Quantifying the environmental support for the dilution and abatement of process emissions: the case of electricity production. Journal of Cleaner Production. 2002;10(4):37–50.
- [250] Doherty SJ, Nilsson PO, Odum HT. 2002. Emergy Evaluation of Forest Production and Industries in Sweden. Uppsala: Swedish University of Agricultural Sciences; 2002.
- [251] Cornelissen RL. Thermodynamics and sustainable development - The use of exergy analysis and the reduction of irreversibility [dissertation]. Twente: University of Twente; 1997.
- [252] Coatanéa E. Conceptual Modelling of Life Cycle Design [dissertation], Espoo: Helsinki University of Technology; 2005.
- [253] Medyna G. Environmental Assessment approach for the first stages of product design [dissertation], Chatenay-Malabry, Pariz: Ecole Centrale Paris; 2013.
- [254] Almeida CMVB, Rodrigues AJM., Bonilla SH, Giannetti BF. Emergy as a tool for Ecodesign: evaluating materials selection for beverage packages in Brazil. Journal of Cleaner Production. 2010;18:32-43.
- [255] Giffin M, de Weck O, Bounova G, Keller R, Eckert C, Clarkson PJ. Change Propagation Analysis in Complex Technical Systems. Journal of Mechanical Design. 2009;131.
- [256] Lindeman U, Lorenz M. Uncertainty handling in integrated product development. In: Marjanović D, Štorga M, Pavković N, Bojčetić N, editors. 10th International Design Conference - DESIGN 2008; Dubrovnik, 19.-22.5.2008. Zagreb/Glasgow: Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture/The Design Society; 2008.

- [257] Cziulik C. Concept Evaluation Methods Associated with Virtual Prototyping Techniques as Means for Reducing Lead Time in Product Development. *Concurrent Engineering in Product Design and Development*. 2003.
- [258] Van Berkel R. Innovation and technology for a sustainable materials future. *Materials Forum*, Vol. 30, Institute of Materials Australasia Ltd; 2006.
- [259] Kishita Y, Low BH, Fukushige S, Umeda Y, Suzuki A, Kawabe T. Checklist-based assessment methodology for sustainable design. *Journal of Mechanical Design*. 2010;132(9).
- [260] Favi C. Toward eco-design: an integrated lifecycle engineering system to develop sustainable mechatronic products and services [dissertation]. Ancona: Università Politecnica delle Marche; 2012.
- [261] Ostad-Ahmad-Ghorabi H, Bey N, Wimmer W. Parametric ecodesign—an integrative approach for implementing ecodesign into decisive early design stages. In: Marjanović D, Štorga M, Pavković N, Bojčetić N, editors. 10th International Design Conference - DESIGN 2008; Dubrovnik, 19.-22.5.2008. Zagreb/Glasgow: Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture/The Design Society; 2008.
- [262] Millet D, Bistagnino L, Lanzavecchia C, Camous R, Poldma T. Does the Potential of the Use of LCA Match the Design Team Needs? *Journal of Cleaner Production*. 2007;15(4):335-346.
- [263] Li B, Zhang J, Xue D, Gu P. Systematic Lifecycle Design for Sustainable Product Development. *Concurrent Engineering: Research and Applications*. 2011;19(4).
- [264] Collado-Ruiz D, Ostad-Ahmad-Ghorabi H. Influence of environmental information on creativity. *Design Studies*. 2010;31(5):479–498.
- [265] Purcell AT, Gero JS. Design and Other Types of Fixation. *Design Studies*. 1996;17(4):363-383.
- [266] Liikanen L, Perttula M. Inspiring design idea generation: insights from a memory-search perspective. *Journal Engineering Design*. 2010;21(5):545-560.
- [267] Walker S. Experiments in sustainable product design. *The Journal of Sustainable Product Design*. 1998;7:41–50.
- [268] Guinée JB. *Handbook on Life Cycle Assessment*. New York: Kluwer Academic Publishers; 2004.
- [269] Skerlos SJ, Jorow WR, Michalek JJ. Sustainable Design and Science: Selected Challenges and Case Studies. In: Abraham M, editor. *Sustainability Science and Engineering*. New York: Elsevier B.V.; 2006. p. 477-525.
- [270] DeVierno A, Thorn B, Carrano AL. Combining Life Cycle Assessment and Linear Regression Analysis to Determine Significant Design Characteristics. In: 17th Design for Manufacturing and the Life Cycle Conference - ASME 2012; 2012.
- [271] Vallet F, Eynard B, Millet D, Mahut SG, Tyl B, Bertoluci G. Using eco-design tools: An overview of experts' practices. *Design Studies*. 2013;34(3):345-377.
- [272] Yan P, Zhou M, Sebastian D, Caudill R. Integrating Eco-compass Concept into Integrated Product and Process Development. *International Journal of Environmentally Conscious Design & Manufacturing*. 2002;10(3).

- [273] Cluzel F. Eco-design implementation for complex industrial system: From scenario-based LCA to the definition of an eco-innovative R&D projects portfolio [dissertation]. Chatenay-Malabry, Pariz: Ecole Centrale Paris; 2012.
- [274] Gómez Navarro T, Capuz Rizo S, Bastante Ceca MJ, Collado Ruiz D. Ecodesign Function and Form. Classification of Ecodesign Tools According to their Functional Aspects. In: International Conference on Engineering Design - ICED 05; Melbourne, 15.-18.08.2005.
- [275] Heo Y. Methodology for Prioritizing DfE Strategies based on LCA and AHP [master thesis]. Korea: Graduate School of Ajou University; 2001.
- [276] Cross N. Expertise in design: an overview. *Design Studies*. 2004;25(5):427-441.
- [277] Graulich K, Blepp M, Brommer E, Gensch C-O, Mudgal S, Cervantes R, Faninger T, Lyons L. Preparatory Studies for Eco-Design Requirements of Energy-using-Products [Internet]. 2011; [cited 2015 Nov 1]. Available from: [http://www.eup-network.de/fileadmin/user\\_upload/Produktgruppen/Lots/Working\\_Documents/EuP\\_Lot24\\_Wash\\_T1\\_Report\\_ENER\\_clean.pdf](http://www.eup-network.de/fileadmin/user_upload/Produktgruppen/Lots/Working_Documents/EuP_Lot24_Wash_T1_Report_ENER_clean.pdf)
- [278] Tukker A, Jensen B. Environmental Impacts of Products A Detailed Review of Studies. *Journal of Industrial Ecology*. 2006;10(3):159-182.
- [279] Rüdénauer I, Gensch C-O, Quack D. Eco-Efficiency Analysis of Washing machines – Life Cycle Assessment and determination of optimal life span, Freiburg: Öko-Institut e.V.; 2005.
- [280] Koerner M, Schulz M, Powell S, Ercolani M. The life cycle assessment of clothes washing options for City West Water's residential customers [Internet]. 2011; [cited 2015 Nov 1]. Available from: <http://www.conference.alcas.asn.au/2011/Koerner.pdf>
- [281] Dunn A, Kohlitz J, Cao K, Yang M. Whirlpool Duet Washing Machine Water Recycling and Reduction Project, Final Report, ME 450 Team 12, April 15, 2008.
- [282] Germani M, Mengoni M, Raffaelli R. Multi level Representation for Supporting the Conceptual Design Phase of Modular Products. Krause F-L, editor. In: *The future of product development*. Berlin/Heidelberg/New York: Springer; 2007. p. 209-224.
- [283] Coons D, Dankowski M, Diehl M, Jakobi G, Kuzel P, Sung E, Trabitzzsch U. *Performance in Detergents, Cleaning Agents and Personal Care Products*; 1987.
- [284] Samsung. Samsung Home Appliances, Laundry, EcoBubble: Wash Cool, Save Energy [Internet]. [cited 2015 Nov 1]. Available from: <http://www.samsung.com/uk/ecobubble/>
- [285] Gallego-Juarez JA, Riera E, Acosta V, Rodríguez G, Blanco A. Ultrasonic system for continuous washing of textiles in liquid layers. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2010;17:234–238.
- [286] Electrolux. Electrolux annual report 2011: Perfect technology for stain removal – Ultra Clean [Internet]. 2011; [cited 2015 Nov 1]. Available from: <http://annualreports.electrolux.com/2011/en/strategy/productsandservices/innovativeproducts/innovativeproducts.html>
- [287] Wired magazine. 'Orbit' washing machine concept levitates your clothes [Internet]. 2012; [cited 2015 Nov 1]. Available from: <http://www.wired.co.uk/news/archive/2012-02/17/dry-ice-washing-machine>

- [288] Yanko Design. What Laundry Looks Like in 2050 [Internet]. [cited 2015 Nov 1]. Available from: <http://www.yankodesign.com/2012/06/25/what-laundry-day-looks-like-in-2050/>
- [289] Tuvie. Orbit Spherical Washing Machine For Future Generations [Internet]. [cited 2015 Nov 1]. Available from: <http://www.tuvie.com/orbit-spherical-washing-machine-for-future-generations/>
- [290] Xeros. Xeros Bead Technology [Internet]. [cited 2015 Nov 1]. Available from: <http://www.xeroscleaning.com/xeros-bead-technology>
- [291] Franssen M. Arrow's theorem, multi-criteria decision problems and multi-attribute preferences in engineering design. *Research in Engineering Design*. 2005;16:42-56.
- [292] Derelöv M. On Evaluation of Design Concepts-Modelling Approaches for Enhancing the Understanding of Design Solutions [dissertation]. Department of Management and Engineering, Linköping, Švedska, 2009.
- [293] Hansen CT. A Proposal for a Mindset for Decision-Making in Engineering Design. In: *Proceedings of NordDesign 2000*, Copenhagen, pp. 45-54.
- [294] Finger S, Dixon JR. A Review of Research in Mechanical Engineering Design. Part II: Representations, Analysis, and Design for the Life Cycle. *Research in Engineering Design*. 1989;1:121-137.
- [295] Straton A. A complex systems approach to the value of ecological resources. *Ecological Economics*. 2006;56:402-411.
- [296] Erden MS, Komoto H, Beek TJV, D'Amelio V, Echavarria E, Tomiyama T. A review of function modeling: approaches and applications. *Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing*. 2008;22(2):147-169.
- [297] Poel Van de I, Kroes P. Can technology embody values? In: *The moral status of technical artefacts*, Kroes P., Verbeek P.-P. (eds.), Dordrecht: Springer, 2014, pp. 103-124.
- [298] Roth K. Design catalogues and their usage. *Engineering Design Synthesis: Understanding, Approaches and Tools*. Chakrabarti A. (ur.), Springer-Verlag London Limited; 2002, pp. 121-129.
- [299] Brunetti G, Golob B. A feature-based approach towards an integrated product model including conceptual design information. *Computer-Aided Design*. 2000;32:877-887.
- [300] Zadnik Ž, Čok V, Karakašić M, Kljajin M, Duhovnik J. Modularity Solutions Within A Matrix of Function and Functionality (MFF). *Technical Gazette*. 2011;18):471-478.
- [301] Kljajin M, Ivandić Ž, Kozak D. Multiple attribute decision making towards most acceptable variant solution. In: Marjanović D, Štorga M, Pavković N, Bojčetić N, editors. *International Design Conference - DESIGN 2004*; Dubrovnik, Hrvatska, 17.-20.05.2004. Zagreb/Glasgow: Fakultet strojarstva i brodogradnje, Sveučilište u Zagrebu/The Design Society; 2004.
- [302] Vuković M. Teorija skupova. Predavanja. Sveučilište u Zagrebu, PMF-Matematički odsjek, Zagreb, 2013.
- [303] Fülöp J. Introduction to Decision Making Methods. In: *BDEI-Workshop*, 2005, pp. 1-15.

- [304] Mullur AA, Mattson CA, Messac A. Pitfalls of the Typical Construction of Decision Matrices for Concept Selection, 41st Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Paper No. AIAA 2003-0466, Reno, NV, January 06-09, 2003.
- [305] De Boer SJ. Systematic Decisions in Methodical Engineering Design. In: Proceedings of Schriftenreihe WDK 17, Roozenburg N. F. M., Eekels J. (ur.); Schriftenreihe WDK 17, Zürich: Heurista, 1990.
- [306] McKinney M, Shock R, Yonavjak L. Environmental Science - Systems and Solutions. Sudbury: Jones and Bartlett; 2007.
- [307] Finnveden G, Östlund P. Exergies of natural resources in lifecycle assessment and other applications. *Energy/ Science*. 1997;22(9):923-931.
- [308] Brown MT, Ulgiati S. Emergy and environmental accounting. In: Cleveland C. (ur.), *Encyclopedia of energy*, Oxford, UK: Academic Press, Elsevier, 2004.
- [309] Voora V, Thrift C. Using Emergy to Value Ecosystem Goods and Services. February, 2010.
- [310] Cai TT, Olsen TW, Campbell DE. Maximum (em)power: a foundational principle linking man and nature. *Ecological Modeling*. 2004;178:115-119.
- [311] Ohta T. *Energy Technology: Sources, Systems and Frontier Conversion*. Great Britain: Pergamon; 1994.
- [312] Thiede S. *Energy Efficiency in Manufacturing Systems*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2012.
- [313] Greco S, Mousseau V, Slowinski R. Robust multiple criteria ranking using a set of additive value functions. In: B. Roy, M. Aloulou, and R. Kalai, editors, *Robustness in OR-DA*, pp. 95-128. Lamsade, 2007.
- [314] Žavbi R, Fain N, Rihtaršič J. Evaluation of a method and a computer tool for generating concept designs. *Journal of Engineering Design*. 2013;24(4):257-271.
- [315] European Commission. Directive 2008/98/EC of the European Parliament and of the Council on waste and repealing certain Directives. *Official Journal of the European Union L 312*. 2008;51:3-30.
- [316] Rihtaršič J, Žavbi R, Duhovnik J. Application of work elements for the synthesis of alternative conceptual solutions. *Research in Engineering Design*. 2012;23(3):219-234. doi:10.1007/s00163-012-0127-z.
- [317] Chakrabarti A, Johnson A. Detecting side effects in solution principles. *Proceedings of ICED99*, Germany, 1999, pp. 661-666.
- [318] American Cleaning Institute. High Efficiency Washers and Detergents [Internet]. [cited Nov 1 2017]. Available from: <http://www.cleaninginstitute.org/assets/1/Page/HE.pdf>
- [319] Webb A. *Project Management for Successful Product Innovation – 2nd edition*. Hampshire, UK: Gower Publishing Limited; 2000.
- [320] Marjanović D, Štorga M. Podloge za vježbe V1 iz kolegija "Teorija konstruiranja" [nastavni materijali]. Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje; 2011. Available from: <http://e-ucenje.fsb.hr/>
- [321] Sethi S. *Ultrasonic cleaning of highly soiled apparel [dissertation]*. University of Delhi, Delhi, 2012.



- [322] Suslick KS. Sonochemistry, Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology, Fourth Edition, vol. 26: John Wiley & Sons, Inc.: New York, 1998, pp. 516-541.
- [323] Gallego-Juárez JA, Riera E, Acosta VM, Rodríguez G, Pinto A, Blanco A. Ultrasonic system for continuous washing of textiles in liquid layers: semi-industrial development, International Congress on Ultrasonics, 2007, Paper 1406.
- [324] Sutanto S. Textile Dry Cleaning Using Carbon Dioxide: Process, Apparatus and Mechanical Action [dissertation]. Delft, Nizozemska: Technische Universiteit Delft; 2014.
- [325] Ice Tech. Product Catalogue [Internet]. [cited 2015 Nov 1]. Available from: [http://www.icetechworld.com/dmdocuments/evolution\\_line/en/evolution\\_line/evolution\\_line\\_product\\_catalogue.pdf](http://www.icetechworld.com/dmdocuments/evolution_line/en/evolution_line/evolution_line_product_catalogue.pdf)
- [326] Kärcher UK. Dry ice cleaning [Internet]. [cited 2015 Nov 1]. Available from: [http://www.easyfairs.com/uploads/tx\\_ef/K-rcher-IB740-IB15120\\_low\\_res.pdf](http://www.easyfairs.com/uploads/tx_ef/K-rcher-IB740-IB15120_low_res.pdf)
- [327] Triantaphyllou E, Mann SH. An examination of the effectiveness of multi-dimensional decision-making methods: a decision-making paradox. International Journal of Decision Support Systems. 1989;5:303-312.
- [328] Goedkoop M, Spriensma R. The Eco-Indicator'99. A Damage Oriented Method for Life Cycle Impact Assessment. Methodology Report. 3rd Edition. PRé Consultants, Amersfoort, 2001.
- [329] Heta. Leksikon: Mehanički mehanizam [Internet]. [cited 2016 Jul 1]. Available from: <http://www.heta.hr/leksikon/mehanicki-mehanizam/>
- [330] Bernstein WZ, Ramanujan D, Devanathan S, Zhao F, Ramani K, Sutherland JW. Development of a Framework for Sustainable Conceptual Design. Proceedings of the 17th CIRP International Conference on Life Cycle Engineering.
- [331] Finnveden G, Hauschild MZ, Ekvall T, Guinée J, Heijungs R, Hellweg S, Koehler A, Pennington D, Suh S. Recent Developments in Life Cycle Assessment. Journal of Environmental Management. 2009;91(1):1-21.
- [332] Abele E, Anderl R, Birkhofer H. Environmentally-Friendly Product Development. Springer-Verlag London Limited; 2005.
- [333] Hillary R. Life Cycle Assessment. Centre for Environmental Technology, Imperial College of Science and Technology, Great Britain; 1995.
- [334] LinkCycle. Comparison Of Best Life Cycle Assessment Software [Internet]. [cited 2015 Nov 1]. Available from: <http://www.linkcycle.com/comparison-of-best-life-cycle-assessment-software/>
- [335] Goedkoop M, Oele M, Leijting J, Ponsioen T, Meijer E. Introduction to LCA with SimaPro. Report version 5.1, PRé Consultants, Nizozemska, 2013.
- [336] ILCD. Analysis of existing Environmental Impact Assessment methodologies for use in Life Cycle Assessment. International Reference Life Cycle Data System (ILCD), European Commission, Joint Research Centre, Institute for Environment and Sustainability, 2010.
- [337] Goedkoop M, Oele M, de Schryver A, Vieira M, Hegger S. SimaPro Database Manual. Methods Library, PRé Consultants, 2010.

- [338] Pizzol M, Christensen P, Schmidt J, Thomsen M. Impacts of “metals” on human health: a comparison between nine different methodologies for Life Cycle Impact Assessment (LCIA). *Journal of Cleaner Production*. 2011;19(6-7):646-656.
- [339] Hauschild M, Potting J. Spatial differentiation in life cycle impact assessment – the EDIP2003 methodology. Guidelines from the Danish Environmental Protection Agency, Copenhagen, 2004.
- [340] Jolliet O, Margni M, Charles R, Humbert S, Payet J, Rebitzer G. IMPACT 2002+: A New Life Cycle Impact Assessment Methodology. *International Journal of LCA*. 2003;8(6):324-330.
- [341] Bare JC. TRACI 2.0 - The Tool for the Reduction and Assessment of Chemical and other environmental Impacts. *Clean technologies and Environmental Policy*. 2011;13(5):687-696.
- [342] Hauschild MZ, Huijbregts M, Jolliet O, MacLeod M, Margni M, van de Meent D, Rosenbaum RK, McKone TE. Building a model based on scientific consensus for life cycle impact assessment of chemicals: the search for harmony and parsimony. *Environmental Science and Technology*. 2008;42(19):7032-7037.
- [343] Sonneman G, Castells F, Schumacher M. Integrated Life-Cycle and Risk Assessment for Industrial Processes, Lewis Publishers, Florida, USA, 2004.
- [344] WRAP. Environmental life cycle assessment (LCA) study of replacement and refurbishment options for domestic washing machines. Waste & Resources Action Programme, Banbury, England; 2010.
- [345] Kemna R. Methodology for Ecodesign of Energy-related Products. MEErP 2011 Methodology Report - Part 1: Methods. Brussels/Delft: COWI Belgium sprl, Van Holsteijn en Kemna B.V., 2011.
- [346] Samsung. Samsung Eco Bubble WF80F5E5U4W [Internet]. [cited 2015 Nov 1]. Available from: [www.samsung.com/hr/consumer/home-appliances/washing-machines/washer/WF60F4E2W2W/LE](http://www.samsung.com/hr/consumer/home-appliances/washing-machines/washer/WF60F4E2W2W/LE)
- [347] A.I.S.E. The Case fo the "A.I.S.E. Low Temperature Washing" Initiative. International Association for Soaps, Detergents and Maintenance Products, June 2013.
- [348] Pertl A, Obersteiner G, Scherhauser S, Den Boer J. Ecological and economic assessment of formal versus informal waste management strategies – A case study. In: Gidarakos E., Cossu R., Stegmann R. (Eds.), Crete 2010 - 2nd International Conference on Hazardous and Industrial Waste Management; 2010.
- [349] McNamara D. Life Cycle Assessment of Washing Machine [Internet]. [cited 2017 Nov 1]. Available from: [https://mcnamaradavid.files.wordpress.com/2013/12/et4407\\_lca\\_washingmachine1.pdf](https://mcnamaradavid.files.wordpress.com/2013/12/et4407_lca_washingmachine1.pdf)
- [350] Saouter E, van Hoof G. A Database for the Life-Cycle Assessment of Procter & Gamble Laundry Detergents. *International Journal of Life Cycle Assessment*. 2001;7(2).
- [351] Schrödter K, Bettermann G, Staffel T, Wahl F, Klein T, Hofmann T. Phosphoric Acid and Phosphates. *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry*, Wiley-VCH, Weinheim; 2008.

- [352] Lasic E. Sustainable use of washing machine: modeling the consumer behavior related resources consumption in use of washing machines [dissertation]. Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, Landwirtschaftlichen Fakultät, Njemačka, 2014.
- [353] Smulders E, Rähse W, von Rybinski W, Steber J, Sung E, Wiebel F. Laundry detergents. In: Smulders, E. (ur.). Weinheim, Njemačka: Wiley-VCH Verlag GmbH; 2002.
- [354] Stamminger R, Barth A, Dörr S. Comparison Between Old and New Washing Machines. *Hauswirtschaft und Wissenschaft*. 2005;3:124-131.
- [355] Bourrier C, Corsini F, Danthurebandara M, Fuchs K, Olloz S, Poulikidou S, Rufener S, Singh R. Washing Machine. ETH Sustainability Summer School report; Swiss Federal Institute of Technology Zürich; 2001.
- [356] Grandjean A, Bineta G, Biereta J, Adnot J, Duplessis B. A functional analysis of electrical load curve modelling for some households specific electricity end-uses. In: 6th International Conference on Energy Efficiency in Domestic Appliances and Lighting – EEDAL'11, May 2011, Copenhagen, pp. 271-294.
- [357] Vouters M, Rumeau P, Tierce P, Costes S. Ultrasounds: an industrial solution to optimise costs, environmental requests and quality for textile finishing. *Ultrasound Sonochemistry*. 2004;11:33-38.
- [358] Gallego-Juárez JA, Nájera Vázquez de Parga G, Rodriguez Corral G, Vazquez Martinez F, Van der Vlist P. Process and device for continuous ultrasonic washing of textiles. U.S. Patent, n° US 6,266,836 B1, Jul. 31, 2001.
- [359] Hladni val. Oprema za pjeskarenje suhim ledom [Internet]. [cited 2015 Nov 1]. Available from: <http://www.hladnival.hr/i2.php?d=1>
- [360] Lindqvist K, Marcusson A, Karthaeuser J, Hamrefors J. Carbon Dioxide Cleaning Method. US2008/0223406; 2008.
- [361] Enviro Blast. How it works [Internet]. [cited 2015 Nov 1]. Available from: <http://www.enviro-blast.com/itworks.htm#1>
- [362] Wells SP, Sawford M, Szymczyk WR, Abercrombie EJ, Jenkins SD. Cleaning method and apparatus. US 2015/0128358 A1, United States Xeros Limited, 14 May 2015.
- [363] The Florida News Journal. New Washing Machine Tech By Xeros Uses Almost No Water [Internet]. [cited 2015 Nov 1]. Available from: <http://www.thefloridanewsjournal.com/2014/02/13/new-washing-machine-tech-xeros-uses-almost-no-water>
- [364] Ladylux. Xeros waterless laundry technology arrives in North America [Internet]. [cited 2015 Nov 1]. Available from: <http://www.ladylux.com/articles/xeros-waterless-laundry-technology-arrives-in-north-america/>
- [365] Electronic Products. Washing machine uses plastic beads instead of water, reduces electricity by 47% [Internet]. [cited 2015 Nov 1]. Available from: [http://www.electronicproducts.com/Power\\_Products/Power\\_Management/Washing\\_machine\\_uses\\_plastic\\_beads\\_instead\\_of\\_water\\_reduces\\_electricity\\_by\\_47.aspx?id=154](http://www.electronicproducts.com/Power_Products/Power_Management/Washing_machine_uses_plastic_beads_instead_of_water_reduces_electricity_by_47.aspx?id=154)
- [366] Europska komisija. Uredba (EU) br. 259/2012 Europskog parlamenta i Vijeća od 14. ožujka 2012. Službeni list Europske unije; 2012.

- [366] Showell MS. Powdered Detergents. Surfactant science series vol. 71, New York: Marcel Dekker, Inc.; 1998.
- [367] Yu S, Wang J, Tao J. Generation and Evaluation of Product Life Cycle Scenarios in Conceptual Design, International Conference on Software Knowledge Information Management and Application (SKIMA 2006), December 12-15, ChiangMai, Thailand, 2006.
- [368] Reap J, Roman F, Duncan S, Bras B. A survey of unresolved problems in life cycle assessment - Part 1: goal and scope and inventory analysis. *The International Journal of Life Cycle Assessment*. 2008;13(4):290-300.
- [369] Reap J, Roman F, Duncan S, Bras B. A survey of unresolved problems in life cycle assessment - Part 2: impact assessment and interpretation. *The International Journal of Life Cycle Assessment*. 2008;13(5):374-388.
- [370] Gericke K, Eckert C, Stacey M. What do we need to say about a design method? In: *Proceedings of the 21st International Conference on Engineering Design (ICED17)*, Vol. 7: Design Theory and Research Methodology, Vancouver, Canada, 21.-25.08.2017.
- [371] Cullen JM, Allwood JM. Theoretical efficiency limits for energy conversion devices. *Energy*. 2010;35:2059-2069.
- [372] Sherwin C, Bhamra T. Beyond Engineering: Ecodesign as a Proactive Approach to Product Innovation. In: *Proceedings of EcoDesign '99: First International Symposium on Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing*, 01.-03.02.1999., Tokyo, Japan; 1999.
- [373] Nikander JB, Liikkanen LA, Laakso M. Naturally emerging decision criteria in product concept evaluation. In: *International Conference on Engineering Design - ICED 2013*; 2013.
- [374] Vermaas P, Eckert C. Special issue on "Functional descriptions in engineering". *AI-EDAM*, 2013;27(3).
- [375] Rodriguez Moreno P, Rohmer S, Ma H-W. Analysis between potential relationships between functional analysis and life cycle assessment. *Procedia CIRP*. 2015;29:390–395.
- [376] Srinivasan V, Chakrabarti A. Development of a Catalogue of Physical Laws and Effects Using SAPPhIRE Model. *Design Creativity* 2010, pp. 123-130. doi: 10.1007/978-0-85729-224-7\_17.
- [377] Ponn J, Lindemann U, Diehl H, Müller F. Sketching in early conceptual phases of product design: guidelines and tools. In: Hughes JF, Jorge JA. (eds.). *EUROGRAPHICS Workshop on Sketch-Based Interfaces and Modeling*; 2004.
- [378] Iqbal L, Crossley W, Weisshaar T, Sullivan J. Higher Level Design Methods Applied to the Conceptual Design of an MALE UAV. In: *12th AIAA/ISSMO Multidisciplinary Analysis and Optimization Conference – AIAA-2008-5908*, Victoria, BC, Sep. 10-12.09.2008.
- [379] Giachetti RE. A Decision Support System for Material and Manufacturing Process Selection. *Journal of Intelligent Manufacturing*. 1998;9:265-276.

- [380] Midžić I, Marjanović D. Eco design and creativity issues. In: Proceedings of 4th World Conference on Design Research – IASDR2011; Delft, Nizozemska, 31.10.-04.11.2011. Delft: International Association of Societies of Design Research; 2011.
- [381] Voland G. Engineering by Design. Upper Saddle River, NJ: Pearson Prentice-Hall, 2004.

## Popis programskih alata

Pri izradi doktorskog rada i za potrebe istraživanja upotrebljavani su sljedeći programski paketi i alati:

- Adobe Photoshop, Adobe Systems Software Ireland Ltd.  
(<http://www.adobe.com/hr/products/photoshop/free-trial-download.html>)
- CorelDRAW, Corel ([www.corel.com](http://www.corel.com))
- EcoInvent, Ecoinvent Association ([www.ecoinvent.org](http://www.ecoinvent.org))
- FastStone Image Viewer, FastStone Soft (<http://www.faststone.org/>)
- Gadwin Print Screen, Gadwin Systems (<https://www.gadwin.com/printscreens/>)
- IHS Goldfire, IHS Markit ([www.ihsmarkit.com](http://www.ihsmarkit.com))
- Microsoft Office, Microsoft (<https://www.microsoft.com/en-us/download/office.aspx>)
- Production Inspiration, AULIVE (<http://www.productioninspiration.com/>)
- SimaPro, PRé Sustainability (<https://simapro.com/>).

## Životopis

Ida Midžić rođena je 1985. u Zadru. Završila je zagrebačku Školu primijenjene umjetnosti i dizajna. Magistrirala je strojarstvo 2009. na Fakultetu strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu. Završila je smjer računalno inženjerstvo te usmjerenje računalom integrirani razvoj proizvoda. Dobitnica je Rektorove nagrade Sveučilišta u Zagrebu u ak. god. 2008./2009. za primjenu formalnih gramatika u razvoju proizvoda. Od 2009. do 2015. bila je znanstveni novak na Katedri za konstruiranje i razvoj proizvoda matičnoga fakulteta. Njezino je istraživanje dio projekta *Modeli i metode upravljanja znanjem u razvoju proizvoda* te od 2015. projekta „*Models and Methods of Innovation Management in Complex Engineering Systems Development*” Ministarstva znanosti, obrazovanja i sporta Republike Hrvatske i Hrvatske zaklade za znanost. Na Katedri za konstruiranje i razvoj proizvoda sudjelovala je na brojnim projektima te u nastavnim aktivnostima izvođenjem vježbi iz kolegija *Programiranje i algoritmi*, *Oblikovanje pomoću računala*, *Razvoj proizvoda* i *European Global Product Realization*. Sudjelovala je u organizaciji konferencije *International Design Conference – DESIGN*. Završila je poslijediplomski studij strojarstva na matičnom fakultetu, smjer teorija konstrukcija. Bila je članica organizacije *The Design Society*. Od 2016. sudjeluje na međunarodnom projektu *DRAWDOWN* na rješenjima za usporivanje klimatskih promjena. Objavila je rad u znanstvenom časopisu s međunarodnom recenzijom, sedam radova na međunarodnim konferencijama te dva tehnička izvještaja. Radila je u tvrtki RASCO na konstruiranju proizvoda i tvrtki GlobalLogic na razvoju softvera. Danas je razvojni programer u tvrtki dSPACE engineering u Zagrebu. Tečno govori, čita i piše na engleskom jeziku te posjeduje osnovno znanje njemačkog jezika.

## Popis objavljenih radova

### I. Znanstveni radovi u časopisima:

1. Midžić, Ida; Štorga, Mario; Marjanović, Dorian. Eco-Evaluation In Conceptual Design Phase – A Case Study. *Transactions of FAMENA*. 2015;39(3):47-60.  
(članak, znanstveni)

### II. Znanstveni radovi u zbornicima skupova s međunarodnom recenzijom:

1. Midžić, Ida; Štorga, Mario; Marjanović, Dorian. Validation of the Eco-transformity Method. In: Marjanović D, Štorga M, Pavković N, Bojčetić N, editors. 14th International Design Conference - DESIGN 2016; Dubrovnik, Hrvatska, 16.-19.05.2016. Zagreb/Glasgow: Fakultet strojarstva i brodogradnje, Sveučilište u Zagrebu/The Design Society; 2016.  
(predavanje, međunarodna recenzija, objavljeni rad, znanstveni)
2. Midžić, Ida; Štorga, Mario; Marjanović, Dorian. Eco-evaluation of Technical Systems in the Conceptual Phase. In: Proceedings of the 20th International Conference on Engineering Design - ICED15, Vol. 5: Design Methods and Tools – part 1; Milano, Italija, 27.-30.07.2015. Milano: The Design Society; 2015.  
(predavanje, međunarodna recenzija, objavljeni rad, znanstveni)
3. Midžić, Ida; Štorga, Mario; Marjanović, Dorian. Energy Quality Hierarchy and “Transformity” in Evaluation of Product's Working Principles. In: Lien T, editor. 21st CIRP Conference on Life Cycle Engineering - CIRP LCE 2014; Procedia CIRP, Vol. 15; Trondheim, Norveška, 18.-20.06.2014. Trondheim: Elsevier B.V.; 2014. (predavanje, međunarodna recenzija, objavljeni rad, znanstveni)
4. Midžić, Ida; Štorga, Mario; Marjanović, Dorian. Using ecodesign guidelines for concept evaluation: Findings from an experiment. In: Marjanović D, Štorga M, Pavković N, Bojčetić N, editors. 13th International Design Conference - DESIGN 2014; Dubrovnik, Hrvatska, 19.-22.05.2014. Zagreb/Glasgow: Fakultet strojarstva i brodogradnje, Sveučilište u Zagrebu/The Design Society; 2014.  
(predavanje, međunarodna recenzija, objavljeni rad, znanstveni)
5. Midžić, Ida; Marjanović, Dorian. Estimation of environmental effects in early product development. In: Proceedings of the 5th International Congress of International Association of Societies of Design Research - IASDR13; Tokyo, Japan, 26.-30.08.2013. Tokyo: International



Association of Societies of Design Research/Japanese Society for the Science of Design/Japan Society of Kansei Engineering/Science Council of Japan; 2013.

(predavanje, međunarodna recenzija, objavljeni rad, znanstveni)

6. Midžić, Ida; Marjanović, Dorian. Eco design and creativity issues. In: Proceedings of 4th World Conference on Design Research - IASDR2011; Delft, Nizozemska, 31.10.-04.11.2011. Delft: International Association of Societies of Design Research; 2011. (poster, međunarodna recenzija, objavljeni rad, znanstveni)

7. Midžić, Ida; Stanković, Tino; Marjanović, Dorian. Context-free grammar based rules for component-level product structure modelling. In: Marjanović D, Štorga M, Pavković N, Bojčetić N, editors. 11th International Design Conference - DESIGN 2010; Dubrovnik, Hrvatska, 17.-20.05.2010. Zagreb/Glasgow: Fakultet strojarstva i brodogradnje, Sveučilište u Zagrebu/The Design Society; 2010.

(predavanje, međunarodna recenzija, objavljeni rad, znanstveni)

### III. Druge vrste radova:

1. Marjanović, Dorian; Štorga, Mario; Bojčetić, Nenad; Pavković, Neven; Stanković, Tino; Midžić, Ida. E4911 TRENIN project report PRO1, 2010.  
(izvješće)
2. Marjanović, Dorian; Štorga, Mario; Bojčetić, Nenad; Pavković, Neven; Stanković, Tino; Midžić, Ida. E4911 TRENIN project report PRO2, 2010.  
(izvješće).

## Biography

Ida Midžić is born in Zadar, Croatia in 1985. She finished the Zagreb School of Applied Arts and Design, and graduated in mechanical engineering from the Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture, University of Zagreb (FAMENA) in 2009. She specialized in Computer Aided Engineering and Computer Integrated Product Development. Her work on formal grammars in product development was awarded University of Zagreb Rector's Award in academic year 2008/2009. From 2009 to 2015 she was employed as researcher and teaching assistant at Chair of Design and Product Development (FAMENA). Her obligations at the Chair included lecturing and teaching undergraduate and graduate mechanical engineering students, faculty courses *Programming and algorithms*, *Computer Aided Design*, *Product Development* and *European Global Product Realization*. She enrolled in postgraduate doctoral study at FAMENA, field of specialization Theory of Structures. Her research is part of research projects *Models and Methods of Knowledge Management in Product Development* and *Models and Methods of Innovation Management in Complex Engineering Systems Development* supported by Ministry of Science, Education and Sports, Republic of Croatia and Croatian Science Foundation. She participated in organization of *International Design Conference – DESIGN* from 2010 to 2016. She was a member of *The Design Society*. Since 2016, she has been participating in project *DRAWDOWN* on global solutions to fight climate change. She published a journal article, seven conference papers, and two technical reports. She was product designer and developer in company RASCO and software developer in company GlobalLogic. Today she is software developer in company dSPACE engineering in Zagreb. She is fluent in English, and she has basic skills in German language.